

La metà nascosta:
l'interfaccia dinamica tra pianta e terreno

8 settembre 2021

Programma

9.30 - *Saluti istituzionali*

Coordina: Amedeo Alpi

9.45 - Relazioni

TEOFILO VAMERALI, GIULIANO MOSCA, AMEDEO ALPI

Tecnologie di studio della radice e risposta adattativa di specie diverse

MARIANA AMATO

Gli organi ipogei e l'ambiente: i servizi ecosistemici

ROSARIO DI LORENZO

Le "radici" del vigneto italiano: passato, presente e futuro

MARCO NUTI, LAURA ERCOLI

La società invisibile e le radici delle piante coltivate

MARIATERESA RUSSO

Il rapporto tra la metà nascosta e la salute dell'uomo: il caso delle nanoplastiche

12.30 - *Conclusione dei lavori*

TEOFILO VAMERALI¹, GIULIANO MOSCA², AMEDEO ALPI²

Tecnologie di studio della radice e risposta adattiva di specie diverse

¹ DAFNAE (Dipartimento di Agronomia, Animali, Alimenti, Risorse naturali e Ambiente),
Università degli Studi di Padova

² Accademia dei Georgofili

In regime di *climate change* i viventi che non si adattano tendono a soccombere. Quando, come e quanto la radice possa influenzare l'adattamento delle piante coltivate al cambiamento climatico non è facile a dirsi. Della radice e dell'intero apparato radicale conosciamo ancora troppo poco, nonostante il ruolo e le funzioni del sistema radicale siano particolarmente rilevanti.

È ben noto come la meccatronica e la robotica si siano inserite di prepotenza nell'agricoltura di precisione proprio nella fase così detta di transizione verso la digitalizzazione. Quanto più a fondo indagheremo sulla radice, nonostante le difficoltà emerse nella ricerca, tanto migliori saranno i successi raggiungibili ad esempio nel *precision farming*, nel dosaggio di acqua e nutrienti, nel controllo delle malerbe e dei parassiti. Ma anche in ambito ricerca in temi più specifici quali: radice e sviluppo del sistema radicale, approccio di fenotipizzazione radicale, fisiologia dello stress radicale, interfaccia suolo-radice e comunicazione sotterranea, interazioni "radice-microrganismi", relazioni con acqua e nutrienti, tecnologie di analisi d'immagine per le funzioni radicali, modellazione dei processi radicali e rizosfera, sistemi di radici innestate e comunicazione intra-impianto, servizi ecosistemici/sistemi radicali perennanti.

Sono tutti temi discussi dalla International Society of Root Research (ISRR) nel maggio scorso, in occasione dell'ultimo convegno tenutosi presso la Università del Missouri Columbia, Missouri, US. Per questi motivi è stato scelto questo tema che si ritiene possa essere chiarificatore di tanti aspetti pregnanti e migliorativi in termini di sostenibilità reale, tra transizione ecologica e transizione digitale.

IL RUOLO DELLA RADICE

Il ruolo strategico delle radici delle piante ha sempre destato una notevole curiosità, in quanto coinvolto in numerosi processi che incidono sia sul miglioramento quanti-qualitativo della produzione vegetale, sia sulla sua sostenibilità ambientale. L'interesse per quest'ambito di indagine è tutt'ora attuale e la ricerca incentrata sullo studio delle radici appare oggi orientata in modo sempre più puntuale alla conoscenza delle reciproche interazioni tra parte aerea e pedosfera e la "metà nascosta" della pianta. Le nuove conoscenze sugli apparati radicali che da molte parti fanno irruzione nel campo delle Scienze Agrarie non si sommano a quelle proprie delle singole discipline (agronomia, arboricoltura, ecologia vegetale agraria, ecc.), ma le trasformano e le arricchiscono, consentendo una visione più aggiornata e moderna dei vari problemi delle tematiche agro-ambientali¹. È ben noto come la radice svolga un ruolo chiave in numerosi processi fondamentali, tra cui l'organizzazione dell'intero sistema radicale, l'assorbimento dei nutrienti, le simbiosi microbiche/micorriziche, gli essudati emessi e le molteplici risposte adattative agli stress. Le radici delle piante superiori svolgono un ruolo chiave nei principali servizi di supporto ecosistemici, come la genesi del suolo, i cicli biogeochimici e la creazione di habitat per una presenza di biota estremamente diversificati. L'accrescimento delle radici è fondamentale ai fini dell'adattamento ambientale e della tolleranza della pianta a situazioni di stress, come quelle rappresentate dalla siccità o al contrario da eccesso idrico, salinità, scarsa fertilità o inquinamento dei suoli. Grazie al loro apparato radicale le piante possono vantare una notevole capacità di intercettazione di fitonutrienti e altri ioni minerali dalla rizosfera, che si traduce in una capacità di estrazione di nutrienti quantificabile annualmente e complessivamente per tutti i vegetali in 5 miliardi di tonnellate di minerali. Se confrontato con l'estrazione antropica, il rapporto tra le due entità si stabilizza su 5:1 a favore delle piante.

L'ACCRESIMENTO RADICALE

L'accrescimento si esprime attraverso l'accrescimento ponderale e il rapporto *shoot/root*, la lunghezza radicale e il numero di radici, superficie, diametro e

¹ Il presente contributo deriva da una cospicua attività di ricerca realizzata presso il "Laboratorio degli apparati radicali" di DAFNAE (Dipartimento di Agronomia, Animali, Alimenti, Risorse naturali e Ambiente) dell'Università di Padova i cui risultati sono stati pubblicati su riviste scientifiche internazionali in ben tre decenni di ricerche.

volume radicale, approfondimento e volume di terreno esplorato, ramificazione e infine rappresentato tramite dei Modelli di accrescimento.

LA DIMENSIONE DELLA RADICE

Un mondo liscio o rugoso? In natura i frattali sono importanti dato che non sono appunto presenti dei bordi lisci.

Il mondo nel quale viviamo si caratterizza per la presenza di rugosità e spigolosità irregolari, mentre le superfici lisce sono una eccezione. Si sono accettate forme appartenenti a una geometria piana (euclidea) che descrive solo forme che ben di rado, se non mai, si trovano nel mondo reale. La geometria euclidea descrive forme ideali come il quadrato, il cerchio, la sfera. Nella vita quotidiana incontriamo certamente queste forme, ma esse, afferma il matematico Benoit Mandelbrot, per lo più derivano dall'opera della mano dell'uomo (edifici, scafole...) e non della natura. I frattali rivelano una nuova area della matematica che ha a che fare in maniera diretta con lo studio della natura.

La natura si presenta a noi con forme non uniformi e con bordi ruvidi. Le nubi non sono sferiche, la corteccia degli alberi non è liscia, i fulmini non viaggiano in linea retta, le montagne non sono perfettamente coniche, i bordi delle coste non sono cerchi. La geometria frattale è quella del mondo naturale (animale, vegetale, minerale).

Il termine «frattale», coniato da Mandelbrot nel 1975, deriva da *fractus*, che esprime l'idea di discontinuo, frammentato, interrotto. La geometria frattale è la geometria delle forme irregolari che si riscontrano in natura. I frattali sono caratterizzati da un dettaglio infinito, una infinita lunghezza e assenza di parti lisce come ad esempio la radice. La dimensione frattale spiega numerosi processi naturali. La caratteristica fondamentale degli oggetti frattali è l'autosimilarità: una forma autosimile è composta da una forma base che si ripete su scala infinita.

Tutto ciò comporta non poche difficoltà nel dimensionamento sperimentale delle radici.

METODI DI STUDIO DELL'APPARATO RADICALE

Il sistema radicale è una sorta di universo sconosciuto non sempre facile da osservare e misurare. Pertanto i ricercatori più virtuosi continuano a cimentarsi nella realizzazione e perfezionamento di nuove metodologie di studio. I metodi di studio degli apparati radicali delle piante si suddividono in conservativi e distruttivi. Le prime indagini sulla morfologia dell'apparato radicale

risalgono all'inizio del diciottesimo secolo e furono realizzate con tecniche distruttive (Böhm, 1979). L'interesse alla dinamica di accrescimento e sviluppo delle radici e la necessità di migliorare i sistemi d'osservazione ha condotto nel tempo al perfezionamento delle metodologie esistenti e all'introduzione di altre ex-novo. Le modalità d'impiego di ciascun metodo sono state ampiamente descritte in letteratura (AA.VV., 2000).

I METODI CONSERVATIVI

Questi metodi: profilo di parete, rizotroni e minirizotroni, permettono di osservare lo sviluppo degli apparati radicali direttamente nel terreno attraverso la disposizione in esso di pareti in materiale trasparente in modo da visualizzare le radici che si formano nelle immediate vicinanze.

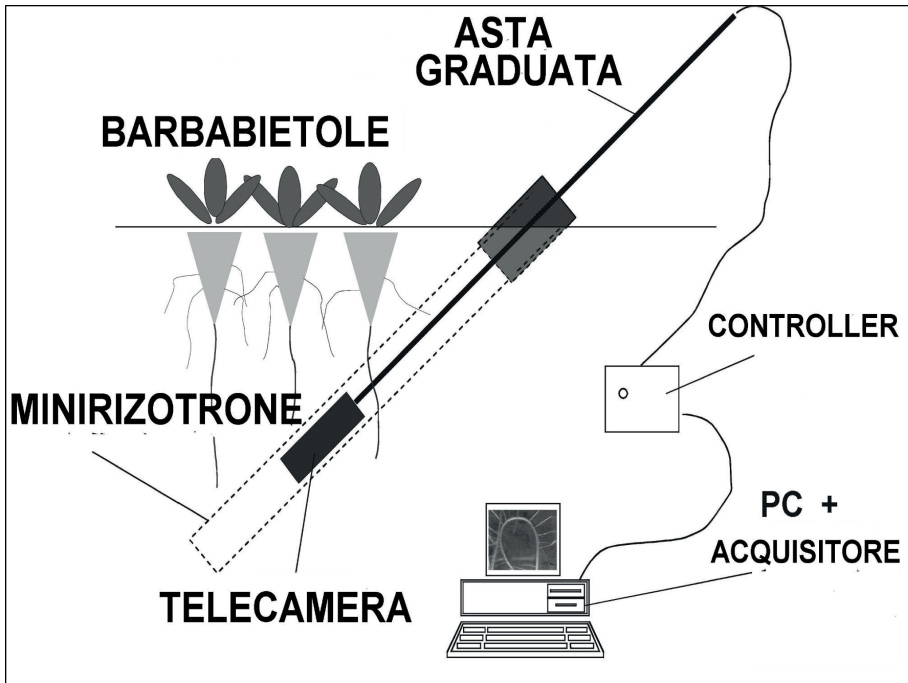
Con il metodo del profilo di parete vengono installati nel suolo dei pannelli trasparenti, che permettono l'osservazione diretta degli apparati radicali. Non ha però grande diffusione a causa del fatto che la distribuzione tridimensionale delle radici è schiacciata su di un piano verticale, e questo non permette di mettere i dati ottenuti direttamente in relazione con l'accrescimento dell'apparato radicale.

I rizotroni sono delle strutture complesse, composte da pareti trasparenti installate in posizione verticale a ridosso del profilo del terreno, accessibili da un corridoio di dimensioni tali da accogliere un osservatore in piedi per la rilevazione del profilo di parete (suolo e radici affioranti). Sono strumenti molto efficaci nel fornire dati descrittivi delle variazioni nel tempo di uno stesso sistema radicale. Il loro uso è però limitato dal loro elevato costo e dalla necessità di prestare una continua e dispendiosa manutenzione.

I minirizotroni sono dei tubi di vario diametro e lunghezza realizzati in materiale trasparente che vengono inseriti nel terreno in corrispondenza delle piante da analizzare. Attraverso l'introduzione periodica di adeguati apparati ottici (mini-telecamera) con registrazione dell'immagine è possibile l'osservazione delle radici presenti all'interfaccia con il terreno circostante. Vi sono anche metodi elettrici che rilevano variabili fisiche correlate all'accrescimento o all'attività delle radici.

METODI DISTRUTTIVI

I metodi distruttivi comportano la distruzione parziale o totale dell'apparato radicale delle piante osservate. In generale i metodi più utilizzati sono il



Schematizzazione dell'osservazione radicale non distruttiva con telecamera e minirizotroni

monolito, il *pinboard* (o metodo della tavola chiodata), il profilo di trincea, il *core-break* (rottura della carota di terreno), il carotaggio, che portano anche alla elaborazione di mappe radicali.

I primi tre consentono di studiare l'apparato radicale prevalentemente in modo descrittivo, fornendo indicazioni sulla distribuzione spaziale dell'intero apparato radicale. Monolito e *pinboard* permettono di definire lo sviluppo radicale in tre dimensioni, il profilo di trincea solo in due. I metodi del *core-break* e del carotaggio sono più veloci e consentono la determinazione della densità radicale lungo il profilo di terreno, attraverso il prelievo di campioni (carote) in punti prestabiliti. Il metodo del monolito consiste nel prelevamento del volume di terreno interessato dall'apparato radicale; si procede poi alla separazione delle radici tramite lavaggio "in situ" o in laboratorio, allontanando il terreno con getti d'acqua in pressione; in questa fase si può verificare una notevole perdita di radici. Non necessita di strumentazioni complesse ma richiede molto tempo e impiego di manodopera e non permette la ripetizione delle osservazioni nel tempo perché molto distruttivo. Il metodo del *pinboard* consiste nell'applicare una tavola chiodata alla parete di una trincea scavata a

fianco dell'apparato radicale che si intende analizzare; la tavola viene quindi estratta tirandola verso l'alto, i chiodi infissi nella porzione di terreno permettono di estrarre le radici mantenendole nella posizione originale. L'apparato radicale viene poi lavato con l'acqua per allontanare il terreno e può quindi essere fotografato per analizzare la distribuzione delle radici. Si eseguono poi analisi di tipo quantitativo quali peso secco, diametro e lunghezza delle radici. Sebbene permetta una buona analisi quali-quantitativa dell'apparato radicale analizzato, anche questo metodo richiede un notevole dispendio di tempo e manodopera ed è molto distruttivo. È indicato se si hanno poche tesi da analizzare e piante con apparato radicale non molto espanso. Il metodo del profilo di trincea prevede lo scavo di una trincea con fronte parallelo alle file di semina o d'impianto delle radici. Questa deve essere di dimensioni tali da consentire il movimento di un operatore. Una volta messe in evidenza le radici si procede al loro conteggio e mappatura. Anche questo metodo è molto laborioso, e presenta difficoltà nel distinguere le radici più piccole, causando errori di sottostima nella fase di conteggio e mappatura. Con il metodo del *core-break* viene prelevata una carota di terreno e questa viene suddivisa in segmenti di lunghezza variabile (solitamente 10 cm); i singoli campioni così ottenuti vengono quindi spezzati manualmente in due parti all'incirca uguali in modo da mettere in evidenza le radici sulle due superfici di rottura e renderne possibile il conteggio, che avviene ad occhio nudo o con l'ausilio di lenti di ingrandimento. Questo metodo è caratterizzato dalla semplicità e rapidità di esecuzione, ma i dati possono essere utilizzati solo per fini comparativi. I campioni esaminati possono essere lasciati in campo oppure utilizzati per stimare la densità radicale con i metodi che prevedono la separazione delle radici dal terreno. In questo caso i campioni vanno insacchettati in buste di plastica annotando a quale profilo di terreno corrispondono e conservati a -18°C fino al lavaggio. Il metodo del carotaggio o *soil-coring* consiste nel prelevare campioni di terreno (carote) utilizzando trivelle manuali o meccaniche. Le carote hanno generalmente lunghezza 1 m e diametro compreso tra 5 e 10 cm; diametri troppo piccoli (2 cm) possono risultare svantaggiosi nel caso in cui la densità radicale sia bassa, comportando quindi un maggior numero di repliche. La separazione delle radici avviene in seguito in laboratorio, mediante lavaggio, provvedendo manualmente alla cernita delle radici vive, eliminando quelle morte e i residui organici. Sui campioni di radici possono essere misurati parametri quantitativi quali: peso, lunghezza, diametro, area radicale. L'impiego del metodo del carotaggio può essere ostacolato dalla presenza di scheletro nel terreno, da terreni troppo coesi che impediscono l'estrazione della carota, o da terreni troppo sabbiosi che rendono impossibile l'ottenimento di una carota integra. Le carote di terreno dopo l'estrazione vengono suddivise in sub cam-



Sistema di prelevamento di carote di terreno, suddivisione del profilo e lavaggio per la separazione delle radici

pioni, generalmente della lunghezza di 10 cm e conservate fino al momento del lavaggio a temperature di -15°C . La separazione delle radici dal terreno avviene tramite lavaggio in acqua o mediante flottazione. Una volta terminato il lavaggio si effettuano le operazioni di pulizia allo scopo di separare le radici vive da quelle morte e dai residui organici. Le radici raccolte vengono quindi conservate in una soluzione al 15-25% di alcool e tenute a basse temperature. La lunghezza radicale viene generalmente riferita all'unità di volume di terreno come densità di lunghezza radicale (RLD, *Root Length Density*) che corrisponde, generalmente in cm di lunghezza su cm^3 di terreno.

Altri metodi sono disponibili tra cui l'analisi d'immagine, i metodi elettrici et al., il geo-radar.

ANALISI D'IMMAGINE

L'acquisizione delle immagini è effettuata posizionando le radici accuratamente su un vassoio; sono consigliati per l'utilizzo vassoi in vetro piuttosto che in plastica perché questi ultimi possono deteriorarsi e alcuni graffi essere scambiati per radici. Per acquisire le immagini sono utilizzati telecamere o scanner. Le prime hanno una velocità di scansione di gran lunga superiore rispetto all'altro, consentendo di ridurre il campo di osservazione per aumentare la risoluzione dell'immagine (Pan e Bolton, 1991), ma richiedono un collegamento a una scheda di acquisizione immagini che converta il segnale analogico in digitale. Vengono quindi utilizzati i comuni scanner 2D disponendo le radici su un velo di liquido (acqua demineralizzata) di 2-3 mm. Le immagini possono essere archiviate in file di diverso formato, in funzione delle procedure di acquisizione e del programma di analisi disponibile, quello

più utilizzato è il formato TIFF (*Tagged Image File Format*) poiché è possibile gestire le informazioni delle immagini (livelli di grigio e colori) e di poterne comprimere le dimensioni in modo più preciso. Le misure ottenute dall'analisi d'immagine possono essere basate su pixel o su oggetti.

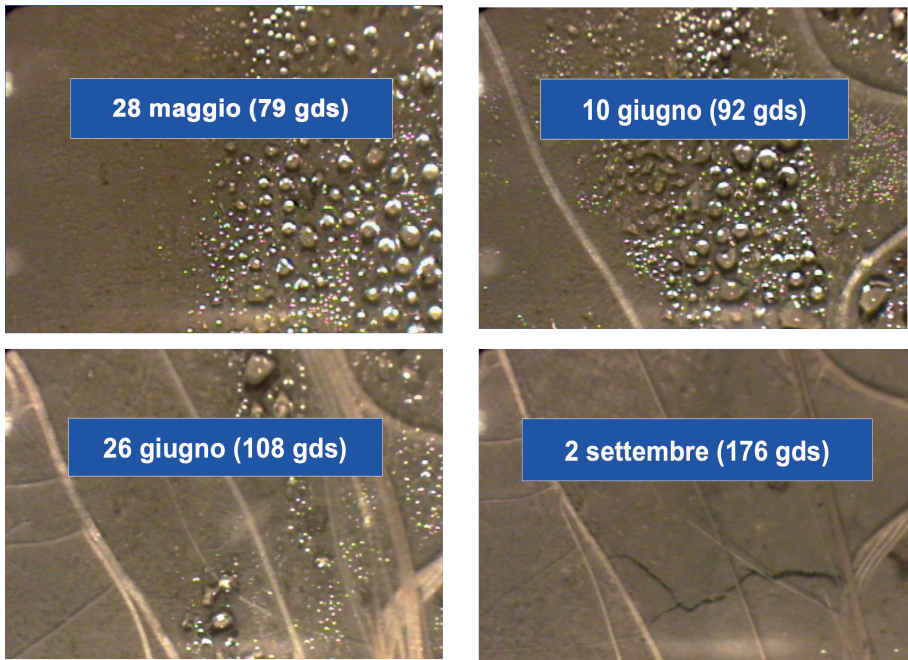
DIMENSIONE DELLA RIZOSFERA

Questo risultato trova la sua motivazione nell'evoluzione dei vegetali che ha dato origine a sistemi radicali che, grazie a una progressiva ripartizione e ramificazione, presentano una superficie di contatto con la rizosfera straordinariamente ampia. L'esperimento di Howard J. Dittmer dell'Università dell'Iowa (USA) dimostra quanto la radice possa estendersi. Negli anni '30, Dittmer isolò in una cassetta di vegetazione (55 cm di profondità e superficie di 77 cm²) una pianta di segale e la coltivò per 4 mesi. A fine esperimento la sua lunghezza radicale complessiva risultava pari a 622 km, pari a una superficie di 237 m². Considerando anche i peli radicali si raggiungevano gli 11.200 km di lunghezza, corrispondenti a una superficie di 650 m². In assenza di competizione e senza stress la segale era dunque in grado di formare un esteso capillizio radicale. Inoltre presso la Station d'Agronomie dell'INRA di Tolosa, Robert Blanchet e collaboratori, nel 1986, avevano stimato che un ettaro di soia irrigua riesce a differenziare un sistema radicale la cui lunghezza complessiva può simbolicamente compiere una volta e mezza la circonferenza terrestre.

RADICE E RIZOSFERA

Tra le innumerevoli peculiarità che caratterizzano la rizosfera è da annoverare anche il sequestro del carbonio, che esercita un certo impatto sul cosiddetto *global change*. Il sistema radicale e i suoi essudati rappresentano infatti una cospicua fonte di immobilizzazione di carbonio organico a diverso grado di rimobilizzazione.

Utilizzando una serie di approcci e terminologie mutuati dalla scienza dei materiali, è stato accertato che le radici influenzano le proprietà fisiche del suolo; questo spiega come gli essudati radicali migliorino i processi di incollaggio interparticellare, di dispersione e di aggregazione, mentre le radici agiscono come un'armatura in fibra. Tutte queste funzioni sono ampiamente influenzate dal suo turnover, ossia dalla dinamica di formazione-accrescimento e morte-decomposizione. La sua incidenza è molto significativa: si ricorda, ad esempio, che in numerose conifere ogni anno dal 30 all'86% delle radici



Dinamica di turnover (90 cm di profondità) in radici di barbabietola da zucchero a diversi giorni dalla semina (GDS)

si disattiva e viene rinnovato; spostandoci poi sulle specie erbacee annuali si può constatare come in barbabietola da zucchero meno circa della metà delle radici fibrose prodotte nel ciclo risultino ancora attive al momento dell'estirpo finale. Il turnover influenza direttamente il potenziale di assorbimento dell'acqua e dei nutrienti e l'intensità di interscambio di messaggi e nutrienti con la rizosfera. A fini produttivi, tranne nei casi di attacchi parassitari, la credenza che «per ottenere una resa elevata non è sempre indispensabile un apparato radicale molto sviluppato» viene invece oggi contraddetta dall'affermazione più realistica che dice: «in genere il motivo di una scarsa resa produttiva è da porre in relazione a un apparato radicale assai ridotto e/o stressato». Un aumento della lunghezza radicale comporta un incremento della resa della coltura secondo un modello lineare, ma la correlazione appare però assai modesta. Questo trova la sua motivazione nel fatto che lo sviluppo radicale e la produzione sono due eventi lontani nel tempo: di fatto la resa si costruisce, tramite le sue principali componenti, durante alcune ben specifiche fasi fenologiche, mentre l'accrescimento radicale segue ritmi di formazione differenti. Lungo il ciclo vegetativo possono verificarsi attacchi parassitari o fenomeni di stress abiotico che, in funzione della loro inten-

sità, tendono a scollegare i due parametri. Quindi una buona dimensione dell'apparato radicale rappresenta una ottima, ma non sufficiente premessa per raggiungere delle elevate rese di prodotto. Quanto detto è la testimonianza dei notevoli progressi compiuti in chiave radicale e di sostenibilità dei vari fenomeni biologici che incidono nel miglioramento quali-quantitativo delle produzioni vegetali. Malgrado le più recenti innovazioni tecnologiche abbiano fornito dei validi strumenti di indagine, restano ancora da chiarire altri aspetti quali la variabilità spaziale delle radici, il loro orientamento nella rizosfera, la risposta all'applicazione di nuovi prodotti della *crop protection*, la presenza di un cosiddetto "centro decisionale-organizzativo" da cui dipende il futuro accrescimento dei peli radicali, le reazioni all'assenza di forza gravitazionale e gli effetti della gravità. Sono infatti note le basi cellulari e i meccanismi del gravitropismo, fenomeno per cui le radici impiegano questa forza come segnale direzionale per esplorare la rizosfera, e realizzare l'ancoraggio oltre che intercettare risorse. Le sfide della moderna agricoltura e dell'attuale situazione ambientale hanno aperto ambiti di studio non del tutto risolti, in cui la ricerca radicale, forte delle conoscenze sopra trattate, riveste un ruolo essenziale. Il crescente trend della popolazione globale, la degradazione del suolo e della sua fertilità, la scarsità idrica e l'aumento dei costi dei fertilizzanti stanno premendo per una seconda rivoluzione verde che abbia come obiettivo quello di potersi avvalere di piante in grado di produrre a bassi livelli di input. In quest'ottica, la radice ha un ruolo cruciale: comprendere la morfologia e le funzioni radicali a partire dal livello cellulare fino all'intero sistema è indispensabile sia per la produzione vegetale che per la difesa dell'ambiente. Una nuova frontiera dello studio radicale sta prendendo piede con la diffusione dell'agricoltura di precisione. Questa si basa sull'applicazione di tecniche e principi che hanno come obiettivo finale l'incremento della *performance* della coltura e la qualità ambientale, attraverso la gestione della variabilità spaziale e temporale, realizzata tramite l'uso di sensori, attuatori, mappe digitali e satelliti. Precisione significa esattezza e accuratezza in ogni aspetto della produzione: gli approfondimenti di ricerca in materia di apparati radicali vanno posti quindi in relazione al management in tutte le fasi del processo produttivo. La ricerca sugli apparati radicali si inserisce persino nell'ambito del contenimento della malnutrizione tramite la biofortificazione, basata sull'arricchimento in micronutrienti delle materie prime destinate all'alimentazione umana, anche tramite le pratiche agronomiche di concimazione fogliare o al suolo. In questo caso però, il sistema pianta deve essere in grado di non superare il confine tra nutrizione e fitotossicità.

RADICE E AMBIENTE

La tutela ambientale riserva una nicchia alla ricerca radicale a completamento degli studi che hanno come obiettivo la conservazione del suolo. La presenza nel terreno di inquinanti chimici, in particolare metalli pesanti derivanti dal settore agricolo e industriale si è fatta via via più critica, tanto da richiederne in alcuni casi il risanamento. Questo può essere fatto tramite la fitorimediazione, una tecnica che sfrutta la capacità delle piante superiori di immobilizzare, degradare o estrarre i contaminanti del suolo e delle acque. Fitoestrazione e fitostabilizzazione sono i due meccanismi impiegati per la bonifica "verde": il primo si basa sull'asportazione di biomassa vegetale in cui si sono accumulati gli inquinanti e sui successivi smaltimento ed eventuale recupero; nel secondo caso invece, la pianta svolge un'azione di immobilizzazione-insolubilizzazione dei contaminanti nella rizosfera o nella radice stessa. Per entrambi i sistemi è necessario avvalersi di una pianta in grado di sviluppare un'estesa biomassa ipogea con un lento e modesto rinnovo delle strutture radicali e di produrre essudati efficaci nel contenimento degli inquinanti. Recenti tecniche prevedono l'uso di erbacee perenni in pendii, scarpate e ai margini delle infrastrutture ("prati armati") con l'obiettivo di arginare l'erosione del suolo e la perdita di materiale, avendo nel contempo bassa manutenzione ed elevata ecosostenibilità. A questo scopo è necessario utilizzare piante con apparati radicali profondi e resistenti: è il caso ad esempio della vetiveria (*Vetiveria zizanioides*), le cui radici, profonde fino a 5 metri circa, sono in grado di imbrigliare il terreno e di fornire una resistenza meccanica alla trazione pari a 1/6 di quella propria dell'acciaio. Le alluvioni e le esondazioni provocate negli ultimi decenni dai cambiamenti socio-economici e territoriali anche nella nostra Penisola hanno portato all'attenzione dell'opinione pubblica la fragilità di interi sistemi produttivi. In questo caso la ricerca radicale si inserisce in una rete di studi agronomici, economici e idraulico-ambientali il cui focus è la garanzia di una produzione che sia traducibile in un reddito minimo anche in caso di esondazione. L'apparato radicale deve essere quindi in grado di sopportare le alterazioni dovute al dilavamento o alla concentrazione di particolari elementi nel profilo del suolo, contribuendo così a conferire al sistema pianta una sorta di "tolleranza alla sommersione".

LA RADICE NELLO SPAZIO

I programmi internazionali di esplorazione spaziale prevedono missioni di durata sempre maggiore; tuttavia la permanenza prolungata dell'uomo nello

spazio comporta ancora problematiche di tipo tecnologico, di approvvigionamento delle risorse e di salute per gli astronauti. In missioni di lunga durata non è possibile fornire interamente da terra le risorse necessarie (cibo, acqua, ossigeno), pertanto le missioni interplanetarie e le lunghe permanenze su piattaforme spaziali dipenderanno dallo sviluppo di sistemi in grado di rigenerare in continuo le risorse primarie. La ricerca svolta nell'ambito della biologia vegetale spaziale dimostra che le piante superiori sono in grado di adattarsi alle condizioni di vita nello spazio, tuttavia le informazioni sugli effetti a lungo termine di queste sui processi fondamentali sono meritevoli di ulteriori ricerche necessarie nell'ottica dell'inserimento nei sistemi biorigenerativi. Le piante superiori rappresentano un ottimo strumento per rigenerare l'aria, mediante l'assorbimento di CO₂ e l'emissione di O₂ nella fotosintesi, purificare l'acqua mediante la traspirazione e riciclare parte dei prodotti di scarto dell'equipaggio (deiezioni) attraverso la nutrizione dei vegetali, fornendo nel contempo cibo fresco per integrare la dieta dell'equipaggio. Alla luce di quanto sopra espresso si auspica l'approfondimento di ricerca della "rizologia", intesa come area di ricerca integrata dalle competenze di agronomi, genetisti, forestali, fisiologi, ecologi, microbiologi e chimici del suolo, in grado di rispondere alle necessità di un ambiente e di un'agricoltura in continua evoluzione.

RIASSUNTO

Lo studio dell'architettura radicale delle piante coltivate desta un crescente interesse poiché le nuove conoscenze aiutano a comprendere i meccanismi di colonizzazione della rizosfera e di adattamento all'ambiente. L'efficienza di acquisizione di acqua e nutrienti rappresenta infatti un argomento focale per la gestione di un'agricoltura sempre più eco-compatibile e sostenibile.

È ben noto come la radice svolga un ruolo chiave in numerosi processi fondamentali, tra cui l'organizzazione del network radicale, l'assorbimento, le simbiosi e le associazioni microbiche, gli essudati e le varie risposte adattative agli stress. Le radici delle piante superiori svolgono inoltre un ruolo essenziale nei principali servizi di supporto ecosistemici, come la genesi del suolo, i cicli biogeochimici e la creazione di habitat per una presenza di biota estremamente diversificati. Agronomicamente, l'accrescimento delle radici è fondamentale ai fini dell'adattamento ambientale e della tolleranza della pianta a situazioni di stress, come siccità o eccesso idrico, salinità, scarsa fertilità o inquinamento dei suoli.

Tra le innumerevoli peculiarità che caratterizzano la rizosfera è da annoverare anche il sequestro del carbonio, che esercita un certo impatto sul cosiddetto *global change*. Il sistema radicale e i suoi essudati rappresentano infatti una cospicua fonte di immobilizzazione di carbonio organico a diverso grado di rimobilizzazione. Utilizzando una serie di approcci e terminologie mutuati dalla scienza dei materiali è stato accertato che le radici influenzano le proprietà fisiche del suolo; questo spiega come gli essudati radicali migliorino i processi di "incollaggio" interparticellare, di dispersione e di aggregazione, mentre

le radici agiscono come un'armatura in fibra. Tutte queste funzioni sono ampiamente regolate dalla dinamica di formazione-accrescimento e morte-decomposizione (turnover), la cui incidenza può arrivare al 50% in barbabietola da zucchero e all'86% annuo delle radici fini in molte conifere. Il turnover influenza direttamente il potenziale di assorbimento dell'acqua e dei nutrienti e l'intensità di interscambio di messaggi molecolari con la rizosfera.

Nonostante le recenti innovazioni tecnologiche abbiano fornito alla ricerca validi strumenti di indagine, sono ancora poche le informazioni sull'architettura radicale. Il presente contributo chiarisce quali tra le possibili metodologie di indagine offrono la possibilità di fare chiarezza su alcune caratteristiche morfo-fisiologiche e funzioni ecologiche dei sistemi radicali. Nella presentazione verranno citate le principali metodologie (distruttive e conservative, mappe radicali, analisi d'immagine, metodi elettrici, ecc.) di studio delle radici.

Una nuova frontiera di indagine radicale sta prendendo piede con la diffusione dell'agricoltura di precisione. Questa si basa sull'applicazione di tecniche e principi che hanno come obiettivo finale l'incremento della performance della coltura e la qualità ambientale attraverso la gestione della variabilità spaziale e temporale, realizzata tramite l'uso di sensori, attuatori, mappe digitali e satelliti. Precisione significa esattezza e accuratezza in ogni aspetto della produzione; gli approfondimenti di ricerca in tema di apparati radicali vanno posti quindi in relazione al management in tutte le fasi del processo produttivo. Sono variabili agronomiche in grado di modificare l'accrescimento radicale la scelta varietale, il dosaggio di fertilizzanti e della risorsa idrica, i trattamenti concianti e biostimolanti al seme e alla pianta, e molti altri. In barbabietola, ad esempio, un più precoce attingimento di acqua da orizzonti profondi si ottiene a dosaggi moderati di azoto; in mais la scelta dell'ibrido basata su indici di accrescimento radicale è invece essenziale per la modulazione dell'apertura stomatica e migliorare l'efficienza d'uso dell'acqua. I biostimolanti rappresentano una delle ultime frontiere nell'ambito nella nutrizione vegetale e, insieme ad alcune nuove molecole fungicide, appaiono promettenti anche nella stimolazione dell'accrescimento radicale in numerose specie coltivate.

Alla luce di quanto sopra espresso si auspica l'approfondimento di ricerca della "rizologia", intesa come area di ricerca integrata dalle competenze di agronomi e genetisti, forestali, fisiologi, ecologi, microbiologi e chimici del suolo, in grado di rispondere alle necessità di un ambiente e di una agricoltura in continua evoluzione.

ABSTRACT

The hidden half: the dynamic interface between plant and soil. The study of root architecture of cultivated plants is gaining growing interest as new knowledge helps to understand the mechanisms of rhizosphere colonization and plant adaptation to the environment. In fact, the efficiency of water and nutrient acquisition represents a crucial topic for the management of sustainable agriculture. It is well known that plant roots play a key role in many fundamental processes, including the organization of root networks, uptake, symbiosis and microbial associations, exudates release and various adaptive responses to stresses. Roots of higher plants also play an essential role in ecosystem support services, such as soil genesis, nutrient cycle and the creation of habitats for contrasting biota.

Agronomically, root growth is essential for environmental adaptation and plant tolerance to stress conditions, such as drought or water logging, salinity, poor fertility or soil pollution. Among many peculiarities that characterize the rhizosphere, there is also carbon sequestration, which has a certain impact on "global change". The root system and its exudates represent a large source of immobilization of organic carbon with different degrees of re-mobilization. Using a series of approaches and terminologies coming from materials science, it has been found that roots affect the physical properties of the soil; this explains how root exudates improve the interparticle "bonding", dispersion and aggregation processes, while the roots act as fibre reinforcement. All these functions are largely regulated by the dynamics of formation-growth and death-decomposition (root turnover), the incidence of which can reach 50% in sugar beet and 86% per year of fine roots in many conifers. Turnover directly affects the uptake potential of water and nutrients and the intensity of the interchange of messages with the rhizosphere. Although recent technological innovations have provided research with valuable investigation tools, there is still little information on root architecture. This contribution can clarify which of the available methodologies can shed light on some morpho-physiological characteristics and ecological functions of root systems. This presentation will mention the main methodologies (destructive and conservative, root maps, image analysis, electrical methods, etc.) for studying plant roots. A new frontier of root investigation is taking place with the spread of precision agriculture. This is based on the application of techniques and principles that have, as their ultimate goal, the increase in crop performance and environmental quality through the management of spatial and temporal variability, achieved through the use of sensors, actuators, digital maps and satellites. Precision implies exactness and accuracy in every aspect of crop management; in-depth research on root systems must therefore be placed in relation to management at all stages of the production process. Among agronomic variables capable of modifying root growth there are: variety choice, fertilization rate and irrigation volume, seed and plant treatment with biostimulants, and many others. In sugar beet, for example, an earlier water uptake from deep horizons is achieved at moderate nitrogen rate; in maize, the hybrid choice based on root growth indices is instead essential for modulating stomata opening and improving the water use efficiency. Biostimulants represent one of the latest frontiers in plant nutrition and, together with some new fungicides, also appear promising in stimulating root growth in many crops. Given this background, it is expected that further insight is gained in "rhizology" as a research area integrated by the skills of agronomists and geneticists, foresters, physiologists, ecologists, microbiologists and soil chemists, capable of responding to the needs of a constantly evolving environment and agriculture.

BIBLIOGRAFIA CONSULTATA

- AA.VV. (2000): *Obiettivo radice. Metodi di studio e risultati ottenuti in ambiente mediterraneo*, a cura di G. Mosca G. e T. Vamerali, Ed. Cleup, Padova.
- BÖHM W. (1979): *Methods of Studying Root Systems*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, XIII, 188.
- BONA S., VAMERALI T., MOSCA G. (1995): *Risposta del sistema radicale del mais (Zea Mays L.) alla riduzione degli input*, «Riv. Agronomia», 29, pp. 339-347.
- DAL CORTIVO C., BARION G., FERRARI M., VISIOLI G., DRAMIS L., PANOZZO A., VAME-

- RALI T. (2018): *Effects of field inoculation with VAM and bacteria consortia on root growth and nutrients uptake in common wheat*, «Sustainability», 10 (3286), pp. 1-11.
- DAL CORTIVO C., BARION G., VISIOLI G., MATTAROZZI M., MOSCA G., VAMERALI T. (2017): *Increased root growth and nitrogen accumulation in common wheat following PGPR inoculation: assessment of plant-microbe interactions by ESEM*, «Agriculture Ecosystems and Environment», 247, pp. 396-408.
- DAL CORTIVO C., CONSELVAN G.B., CARLETTI P., BARION G., SELLA L., VAMERALI T. (2017): *Biostimulant effects of seed-applied sedaxane fungicide: morphological and physiological changes in maize seedlings*, «Frontiers in Plant Science», 8 (2072), pp. 1-11, 6 December 2017.
- DE MICCO V., ARONNE G., COLLA G., FORTEZZA R., DE PASCALE S. (2009): *Agro-biology for bioregenerative Life Support Systems in long-term Space missions: General constraints and the Italian efforts*, «J. Plant Interactions», 4, pp. 241-252.
- LAL R. (2004): *Soil Carbon Sequestration Impact on Global Climate Change and Food Security*, «Science», 304 (5677), 1623-7.
- LESMOIR-GORDON N., ROOD W., EDNEY R. (2010): *I frattali a fumetti*, Raffaello Cortina Ed., Milano, 2010, pp. 177.
- MOSCA G. (2006): *Root system and agro-ecosystem management*, «I Georgofili. Quaderni», VIII, pp. 7-16.
- MOSCA G., VAMERALI T. e BANDIERA M. (2013): *Apparati radicali nell'interfaccia suolo-pianta coltivata: interazioni con acqua, azoto e inquinanti. I*, in Pisante M., *Agricoltura sostenibile*, Edagricole, Bologna, pp. 181-205.
- MUCCIARELLI M., BERTEA C.M., COZZO M., SCANNERINI S. e GALLINO M. (1998): *Vetiveria zizanioides as a tool for environmental engineering*, «ISHS Acta Horticulturae», 457, 33.
- OLIVEIRA M.R.G., VAN NOORDWIJK M., GAZE S.R., BROUWER G., BONA S., MOSCA G., HIRIAH K. (2000): *Auger sampling, ingrowthcores and pineboard methods. I*, in *Root Methods. A Handbook*, Springer-Verlag, pp. 175-210.
- ROMDHANE L., AWAD Y.M., RADHOUANE L., DAL CORTIVO C., BARION G., PANOZZO A., VAMERALI T. (2019): *Wood biochar produces different rates of root growth and transpiration in two maize hybrids (Zea mays L.) under drought stress*, «Archives of Agronomy and Soil Science», 65 (6), pp. 846-866.
- ROMDHANE L., PANOZZO A., RADHOUANE L., DAL CORTIVO C., BARION G., VAMERALI T. (2021): *Effects of soil amendment with wood ash on transpiration, growth and metal uptake in two contrasting maize (Zea mays L.) hybrids to drought tolerance*, «Frontiers in Plant Science», 12, 661909, pp. 1-13.
- ROMDHANE L., PANOZZO A., RADHOUANE L., DAL CORTIVO C., BARION G., VAMERALI T., (2021): *Root characteristics and metal uptake of maize (Zea mays L.) under extreme soil contamination*, «Agronomy», 2021, 11 (178), pp. 1-14.
- SINCLAIR T.R., MOSCA G. e BONA S. (1993): *Simulation analysis of variation among seasons in winter wheat yields in Northern Italy*, «J. Agronomy and Crop Sci.», 170, pp. 202-207.
- VAMERALI T., BANDIERA M., MOSCA G. (2012): *Minirhizotrons in modern root studies*, in *Measuring roots. An updated approach*, S. Mancuso (Ed.), Springer, 17, pp. 341-361.
- VAMERALI T., BONA S., SACCOMANI M., CAGNIN M. e MOSCA G. (2001): *Effect of selection for low input on morpho-physiology of root system in maize*, Proc. XIX Nat. Conf. It. Soc. of Agric. Chem., pp. 377-383.
- VAMERALI T., GANIS A., BONA S., MOSCA G. (2003): *Fibrous root turnover and growth in sugar beet as affected by nitrogen shortage*, «Plant and Soil», 255, pp. 169-177.

- VAMERALI T., GANIS A., BONA S., MOSCA G. (1999): *An approach to minirhizotron root image analysis*, «Plant and Soil», 217, pp. 183-193.
- VAMERALI T., GUARISE M., GANIS A., BONA S., MOSCA G. (2003): *Analysis of root images from auger sampling with a fast procedure: a case of application to sugar beet*, «Plant and Soil», 255, pp. 387-397.
- VAMERALI T., GUARISE M., GANIS A., ZANETTI F., MOSCA G. (2008): *Studying root distribution with geostatistics*, «Plant Biosystems», 142, 2, pp. 428-433.
- VAMERALI T., SACCOMANI M., BONA S., MOSCA G., GUARISE M. E GANIS A. (2003): *A comparison of root characteristics in relation to nutrient and water stress in two maize hybrids*, «Plant and Soil», 255, pp. 157-167.
- VISIOLI G., CONTI F.D., MENTA C., BANDIERA M., MALCEVSCHI A., DAVEY L.J., VAMERALI T. (2016): *Assessing biochar ecotoxicology for soil amendment by root phytotoxicity bioassays*, «Environmental Monitoring and Assessment», 188 (3), 166, pp. 1-11.

MARIANA AMATO¹, ROBERTA ROSSI²

Gli organi ipogei e l'ambiente: i servizi ecosistemici

¹ Università degli Studi della Basilicata

² CREA-ZA

I SERVIZI ECOSISTEMICI

La definizione di servizi ecosistemici, sin dal Millennium Ecosystem Assessment (Hassan et al., 2005), è orientata ai benefici che le società umane ottengono dagli ecosistemi, e li classifica in servizi di supporto (es. formazione del suolo, supporto alla biodiversità, “nutrient cycling”), regolazione (es. stabilizzazione del clima e del suolo, disinquinamento), fornitura di prodotti (alimenti, materie prime, ossigeno, acqua) e cultura (arricchimento intellettuale, ricreativo, estetico). La ricerca del difficile equilibrio fra le diverse categorie di servizi ecosistemici è oggetto di attenzione (Hassan et al., 2005), ed è codificata esplicitamente nel concetto di *intensificazione sostenibile* fra gli obiettivi strategici FAO (FAO, 2009) e implicitamente nei 17 obiettivi per lo sviluppo sostenibile dell'ONU (United Nations General Assembly 2015) che comprendono riduzione di fame e povertà in un mondo a popolazione crescente, contestualmente a salvaguardia ambientale, equità sociale ed innovazione.

Gli strumenti e mercati che sorgono in maniera più o meno regolata per quantificare questi servizi, anche come base per la loro remunerazione, sono volti a quelli più evidenti e riconosciuti, come i servizi relativi ai cambiamenti climatici, e per gli agroecosistemi sono spesso limitati agli effetti dei mezzi di produzione e delle parti epigee delle piante. Le radici e gli organi sotterranei delle piante, però forniscono servizi ecosistemici specifici di notevole entità.

RADICI, CARBONIO E CAMBIAMENTI CLIMATICI

In riferimento al carbonio coinvolto negli scambi fra sistemi terrestri e atmosfera, il pool del suolo è il più importante: si stima che corrisponda a 2500 Gt (1550 Gt organico e 950 Gt inorganico - Lal, 2004), pari a fra 2 e 3 volte quello atmosferico e circa 4,5 volte quello della biomassa epigea (Gardi et al., 2007). Un miglioramento delle stime richiede ulteriori dati specialmente sul C organico in permafrost, torbiere e strati profondi del suolo (Lorenz e Lal, 2019). In ogni caso del C organico ipogeo, quello di origine radicale è pari a 2.4 volte quello di origine epigea, a causa di maggiore resistenza alla decomposizione, interazione con ioni metallici e protezione fisico-chimica anche legata all'attività di peli radicali e micorrize (Rasse et al., 2005).

I servizi ecosistemici ipogei che ne conseguono vanno dalla mitigazione del cambiamento climatico al sostegno alla vita nel suolo.

Ai fini del sequestro del carbonio nel suolo, il carbonio depositato negli strati profondi è il più protetto da turnover e ritorno all'atmosfera pertanto il contributo delle radici profonde è particolarmente importante. Se adeguatamente riconosciuto e sostenuto, questo tratto può trovare nuovo successo nelle strategie di miglioramento genetico e coltivazione delle piante (Kell, 2011) senza comportare necessariamente una riduzione dei servizi ecosistemici di produzione a favore di quelli di regolazione e supporto, in particolare in condizioni di cambiamento climatico. Ad esempio nella rassegna di Ober et al. (2021) i risultati su genotipi con radici profonde mostrano:

- una riduzione della lisciviazione di nitrati
- dati produttivi più elevati in frumento tenero, duro, riso, orzo, mais e sorgo. A questo proposito viene invocato un probabile maggiore accesso a risorse idriche profonde. Un'ipotesi aggiuntiva per i cereali autunno vernini comprende la diversa distribuzione temporale dell'acquisizione idrica fra radici superficiali e profonde: queste ultime, infatti, comportando una maggiore resistenza assiale al trasferimento di acqua, possono determinarne una minore acquisizione in fase vegetativa. In piante che si basano sulla riserva idrica del suolo questo si traduce in una maggiore quota di acqua conservata per il periodo post-antesi, cruciale per la determinazione delle rese, come dimostrato dalle storiche ricerche australiane in cui una rallentata acquisizione idrica pre-floritura è stata un obiettivo del miglioramento genetico del frumento, perseguito in quel caso con una riduzione del diametro xilematico (Richards e Passioura, 1989). Benché sempre importante, un migliore uso delle risorse idriche diventa cruciale in relazione agli scenari di riduzione della disponibilità di acqua legati ai cambiamenti climatici.

Dunque le valenze di un semplice tratto di morfologia radicale sono molteplici: una radice profonda può essere considerata un fornitore multifunzionale di servizi ecosistemici che vanno dalla riduzione della lisciviazione al sequestro del carbonio, al risparmio idrico. Ognuna di queste funzioni comporta poi una cascata di ulteriori meccanismi di grande rilevanza.

RADICI, BIODIVERSITÀ, MODIFICHE DELL'AMBIENTE IPOGEO

Strutture, residui ed essudati ipogei assieme ai residui epigei sono la base della catena alimentare sotterranea, dunque della biodiversità del suolo. Questo aspetto è oggetto di altri contributi in questo stesso numero, ai quali si rinvia. Si segnala solo che accanto alla notevole ricchezza di ricerche sulla rizosfera, c'è una letteratura emergente sulla spermosfera e sulla zoologia ipogea.

Lo studio di questo comparto è di primaria importanza per tutti i servizi ecosistemici legati alla biosfera ipogea e sostegno della vita sul pianeta: gli organi ipogei delle piante e gli organismi che esse sostengono modificano le proprietà fisiche e chimiche del suolo con l'effetto di svolgere una parte del lavoro di coltivazione per noi, a minore costo energetico e ambientale. Ad esempio la produzione di forme di azoto utilizzabili dalle piante è una riduzione chimica a elevato costo energetico, effettuata industrialmente a spese di combustibili fossili, mentre la microflora ipogea svolge questo processo avvalendosi di energia dalla fotosintesi degli organismi autotrofi. Meno noti sono i risparmi di risorse ed energia conseguibili attraverso altri servizi ipogei, fra i quali ad esempio il *biotillage*: azione strutturante ad opera di radici (Zhang e Pong, 2021) che svolgono le funzioni delle lavorazioni meccaniche senza costi economici ed ambientali.

PROPRIETÀ IDROLOGICHE E STABILITÀ DEI SUOLI

Le piante influenzano la stabilità del suolo con molteplici meccanismi, quasi tutti mediati dalle radici, e ascrivibili a effetti meccanici diretti o indiretti, conseguenza delle modifiche del bilancio idrologico (Amato, 2004) e della essudazione di polimeri igroscopici e adesivi (Di Marsico et al., 2018a). La complessità delle interazioni legate a tali fenomeni è affrontata più diffusamente in contributi specialistici (es. Di Marsico et al., 2018a, 2018b) o rivolti a un pubblico più ampio (Amato, 2004; Amato et al., 2000). I meccanismi di rinforzo del suolo da parte delle radici rappresentano un hot-spot della ricerca (Wang et al., 2020) e i loro effetti prevalenti sono:

- a. Un aumento della resistenza a rottura del suolo a opera delle radici, che reindirigono gli sforzi interni al terreno lungo il loro asse longitudinale e li contrastano con la loro resistenza a trazione (Tr), molto più elevata di quella del suolo (Tr è dell'ordine dei MPa per le radici e kPa per il suolo). Notevoli variazioni di Tr si riscontrano fra specie (valori elevati nelle graminacee: es. circa 86 MPa misurati in radici di *Poa* da Amato et al., 2006) dimensione (decescente con l'aumento di diametro), condizioni ($>$ in radici cresciute in pendio), parte anatomica ($>$ nel cilindro centrale) verosimilmente a causa della diversa densità radiale del contenuto in componenti strutturali meccanicamente attive come la cellulosa. L'effetto è mediato dalla diversa elasticità fra radice e terreno (Amato et al., 2006) e dalla resistenza al contatto radice-terreno legata all'ancoraggio delle parti terminali attraverso peli ed essudati, e alla ramificazione. Il risultante rinforzo è stato modellizzato e misurato come funzione della densità radicale. Lo studio dettagliato delle relazioni meccaniche suolo-pianta comprende anche modifiche architettureali. Ad es. le radici di piante cresciute sotto sollecitazione meccanica, tendono a disporsi in modo da lavorare sempre in trazione, massimizzando così il loro effetto stabilizzante.
- b. In generale una diminuzione netta del contenuto medio di acqua nel volume esplorato dalle radici con aumento della stabilità legato alla maggiore coesione e minore peso del terreno (Amato et al., 2006). Essudati igroscopici però proteggono la sabbia da contenuti idrici talmente bassi da comportare riduzione della coesione.
- c. Gli essudati radicali esercitano un effetto strutturante e modificano le proprietà idrologiche del suolo rizosferico. L'effetto stabilizzante dei prodotti rizosferici è descritto nell'agronomia classica: Russell (1986) compara l'effetto delle diverse frazioni organiche sulla entità e dinamica temporale delle proprietà legate alla coesione, ed evidenzia l'effetto notevolissimo dei polisaccaridi freschi di origine soprattutto fungina, rispetto alle frazioni umiche, ma ne sottolinea la breve durata, pari a poche settimane dopo la morte dei microrganismi. Chenu e Guerif (1991) riportano un aumento nella resistenza a rottura del suolo ad opera di tali polisaccaridi. Il termine rizoguaina definisce un particolare film che si sviluppa attorno alla radice e che si compone di peli radicali, mucillagine radicale e batterica il cui volume può essere fino a 5 volte superiore al volume della radice in condizioni di suolo asciutto e circa 1.2 volte se il suolo è bagnato (Watt et al., 1994). Questa matrice collosa e cementante trattiene le particelle di suolo e contribuisce alla creazione di un "ponte liquido" che trattiene l'acqua nel suolo rizosferico (Carminati et al., 2017). La mucillagine radicale è prevalentemente composta di polisaccaridi altamente igrofili a reazione neutra o

acida (94%-97%) sono presenti proteine (3-6%) e in minor misura acidi fenolici e fosfolipidi (Bacic et al., 1986; Moody et al., 1988). I gruppi idrossilici degli zuccheri imbrigliano le particelle di suolo attraverso legami a idrogeno (Watt et al., 1993). Dati produttivi riportati in letteratura sono citati nel lavoro di revisione di Carminati e Vetterlein (2013): orientativamente la pianta può produrre circa 100-140 μg di polisaccaridi per unità di superficie radicale (*Zea mays* L. in sabbia, Floyd and Ohlrogge, 1971); sempre nel mais il tasso di produzione di zuccheri totali nelle 20 ore è risultato di circa 15-20 μg per apice radicale (Chaboud, 1983). Una interessante *review* dedicata alla rizoguaina definisce quest'ultima un tratto potenzialmente importante per aumentare in futuro la sostenibilità in agricoltura (Brown et al., 2017). La rizoguaina infatti contribuisce in vario modo ad aumentare la resistenza agli stress abiotici alleviando lo stress idrico (Basirat et al., 2019) e favorendo direttamente o indirettamente l'uptake di nutrienti come fosforo (Aslam et al., 2021; Brown et al., 2012; Haling et al., 2013), azoto (Wullstein et al., 1979, 1980; Othman et al., 2004) e zinco (Nambiar, 1976). La presenza di mucillagini aumenta inoltre la stabilità degli aggregati nel suolo in maniera considerevole. Un aumento immediato (ma transitorio) del 600% circa è stato osservato aggiungendo mucillagine di mais (2.45 g C kg^{-1}) a un suolo di medio impasto (Morel et al., 1991). Traorè e co-autori (2000) hanno mostrato un aumento della stabilità degli aggregati quasi del 300% aggiungendo mucillagine radicale di mais (2 g C kg^{-1}) a un suolo limoso. Un comparto meno studiato di prodotti rizosferici riguarda la spermosfera delle piante myxospermae, ovvero quelle i cui semi o diaspore producono mucillagine in fase di germinazione (Amato et al., 2018). Una zona limitata attorno al seme ma cruciale per l'attecchimento, specialmente in condizioni di erosione idrica o eolica potenziale, e comunque una zona che influisce sulla stabilità della superficie del suolo. Il seme di chia (*Salvia hispanica* L.), una specie myxosperma, durante la germinazione produce un biopolimero composto per il 93.39% di carboidrati, e fra questi il 22.02 % di acidi uronici, molto igroscopici e carichi elettricamente (Di Marsico et al., 2018a). Questo gel addizionato al suolo modifica la distribuzione diametrica dei pori (Amato et al., 2018), li occupa in parte (di Marsico et al., 2018b), è altamente igroscopico, adesivo e a conducibilità idrica variabile. Amato et al. (2018) e Di Marsico et al. (2018), mostrano come una aggiunta nel suolo del 2% in peso di mucillagine determina un aumento di stabilità degli aggregati compreso fra 100 e 200% in suolo franco e franco-argilloso e di quasi il 400% in suolo franco-sabbioso. Nonostante perdite di C per respirazione l'effetto è risultato persistente per almeno 30 giorni. Alla stabilità della superficie del

suolo contribuiscono sia le colture che le infestanti myxosperme (Ad es. *Capsella bursa pastoris* – Deng et al., 2015), che risultano pertanto anch'esse fornitrici di servizi ecosistemici ipogei

- d. I metodi di imaging dell'interfaccia suolo-seme durante la germinazione (imaging strutturale con tomografia a raggi X – Amato et al., 2018) e della rizosfera in laboratorio (tomografia a raggi X, neutroni, isotopi, risonanza magnetica – Roose et al., 2016) hanno mostrato in questo senso il loro potenziale nello svelare meccanismi e localizzazioni delle modifiche operate dalle strutture vegetali ipogee sull'ambiente circostante, che risultano rilevanti per resistenza e resilienza delle piante, e costituiscono al tempo stesso servizi ecosistemici. Amato et al. (2015) mostrano come la presenza di questi prodotti nella spermosfera comporti già dopo poche ore dalla semina la resistenza al *rainwash* e discutono la conseguente protezione del letto di semina dall'erosione.

Nell'insieme questi risultati mostrano l'enorme entità e la rapidità di fenomeni emergenti di aggregazione a seguito dell'aggiunta di essudati freschi, che hanno lo stesso tipo di eclatante effetto strutturante mostrato da Russel (1986) per i polisaccaridi fungini. L'effetto di questa sostanza organica fresca è importante per aggiornare le nostre idee sulle relazioni fra stabilità dei suoli e sostanza organica basate su composti più stabili come quelli designati come humus (Amato et al., 2018).

I gel polisaccaridici prodotti dagli organi ipogei, date le loro caratteristiche, si prestano però ad applicazioni che vanno oltre questi effetti. Il loro impiego come condizionatori naturali della stabilità del suolo è stato proposto da Di Marsico et al. (2018a). Nell'ambito dell'industria alimentare e salutistica Menga et al. (2017) mostrano che il gel di chia migliora le caratteristiche reologiche della pasta senza glutine, ma anche quelle nutraceutiche grazie al contenuto di antiossidanti, e ne riduce l'indice glicemico dato l'effetto di parziale sequestro degli amidi. Un crescente numero di lavori ne prova la multifunzionalità, con applicazioni che vanno dalla cura dell'obesità (grazie alla forte idratazione che causa senso di sazietà), alla sintesi di pellicole per l'aumento della shelf-life degli alimenti, all'uso come anticorrosivo per l'acciaio (v. in Menga et al., 2017).

Questo apre un ventaglio di servizi ecosistemici che va ben oltre l'ambito ipogeo, nello spirito di un'economia verde per la quale le strutture ipogee delle piante rappresentano un serbatoio ancora poco attinto ma di grandissimo potenziale.

RIASSUNTO

Le radici delle piante sono oggetto di un crescente interesse della ricerca, in larga parte dedicata a studiarne il ruolo di ancoraggio, riserva ed acquisizione di risorse.

Gli organi ipogei però svolgono un ruolo chiave anche nel senso inverso della relazione suolo-pianta: le loro strutture, residui ed essudati, infatti, rappresentano il produttore primario nella dimensione sotterranea. I suoli sono il più grande serbatoio di carbonio (C) terrestre e la maggior parte del C organico ipogeo è di fatto C radicale: i meccanismi di stabilizzazione della sostanza organica determinano una conservazione selettiva del C radicale rispetto a quello di origine epigea (Rasse et al., 2005). La deposizione di carbonio è particolarmente importante negli strati profondi di suolo, ed il miglioramento genetico per la selezione di piante con radici profonde è stato individuato come mezzo per aumentare lo stock di carbonio, l'efficienza e la resilienza delle colture (Kell, 2011). I servizi ecosistemici ipogei vanno dalla mitigazione del cambiamento climatico alla protezione dall'erosione (Amato et al., 2004, 2018; Di Marsico et al., 2018) ed i meccanismi di rinforzo del suolo da parte delle radici rappresentano un hot-spot della ricerca (Wang et al., 2020). La relazione presenta risultati e strategie legate ai comportamenti degli organi sotterranei, i metodi tomografici di imaging per comprendere il ruolo delle "parti nascoste" della pianta per l'ecosistema, ed il potenziale dei prodotti vegetali sotterranei per lo sviluppo di materiali e tecnologie per la sostenibilità dei sistemi naturali e antropici.

ABSTRACT

Belowground plant parts and the environment: ecosystem services and roles. Plant root systems are the object of a growing body of research, largely aimed at their functions for plant statics, storage of assimilates, and acquisition of resources. Below-ground organs, though, play a key role in the reverse direction of the soil-plant relation as well: their structures, residues and exudates represent the primary producer's underground dimension. Soils are the largest terrestrial carbon reservoir, and most organic soil-C is in fact root-C: different SOM (Soil Organic Matter) stabilization mechanisms lead to the selective preservation of root-C over shoot-C (Rasse et al., 2005). Root-C is especially important in deep soil, and breeding for deep roots has been envisaged as a mean to build-up C and improving crop efficiency and resilience (Kell, 2011). Ecosystem services provided by plant roots range from climate change mitigation to erosion protection (Amato et al., 2004, 2018; Di Marsico et al., 2018) and the soil reinforcement potential of plants roots is a research hotspot (Wang et al., 2020). The presentation will focus on results and different strategies linked to specific below-ground behaviours. Two case-studies will focus on the role of tomographic and imaging methods for understanding the role of the plant's "hidden parts" for the ecosystem, and the potential of below-ground plant products for the development of materials and technologies for the sustainability of natural and anthropic systems.

REFERENCES

- AMATO M., LAPENNA V., ROSSI R., BITELLA G. (2012): *Chapter 11. Multi electrode resistivity imaging*, in S. Mancuso (ed.), *Measuring roots – an updated approach*, Springer-Verlag Berlin-Heidelberg-New York, pp. 189-212.
- AMATO M., BOCHICCHIO R., MELE G., LABELLA R., ROSSI R. (2018): *Soil structure and stability in the spermosphere of myxosdiaspore chia (Salvia hispanica L.)*, «Soil Research», 57, pp. 546-558 – <https://doi.org/10.1071/SR18182>.
- AMATO M., LANDI G., MAZZOLENI S. (2006): *Il contributo della vegetazione alla stabilità dei terreni in pendio. Meccanismi e variabilità dei processi*, in Urciuoli G. (ed.), *Questioni di Ingegneria Geotecnica*, Hevelius, pp. 105-125, ISBN 8886977760X.
- ASLAM M.M., KARANJA J.K., YUAN W., ZHANG Q., ZHANG J. & XU W. (2021): *Phosphorus uptake is associated with the rhizosheath formation of mature cluster roots in white lupin under soil drying and phosphorus deficiency*, «Plant Physiology and Biochemistry», 166, pp. 531-539.
- BACIC A., MOODY S. F. & CLARKE A.E. (1986): *Structural analysis of secreted root slime from maize (Zea mays L.)*, «Plant Physiology», 80 (3), pp. 771-777.
- BASIRAT M., MOUSAVI S.M., ABBASZADEH S., EBRAHIMI M. & ZAREBANADKOUKI M. (2019): *The rhizosheath: a potential root trait helping plants to tolerate drought stress*, «Plant and Soil», 445 (1), pp. 565-575.
- BROWN L.K., GEORGE T.S., NEUGEBAUER K. & WHITE P.J. (2017): *The rhizosheath – a potential trait for future agricultural sustainability occurs in orders throughout the angiosperms*, «Plant and Soil», 418 (1), pp. 115-128.
- BROWN L.K., GEORGE T.S., THOMPSON J.A., WRIGHT G., LYON J., DUPUY L. ... & WHITE P.J. (2012): *What are the implications of variation in root hair length on tolerance to phosphorus deficiency in combination with water stress in barley (Hordeum vulgare)?*, «Annals of Botany», 110 (2), pp. 319-328.
- CARMINATI A. & VETTERLEIN D. (2013): *Plasticity of rhizosphere hydraulic properties as a key for efficient utilization of scarce resources*, «Annals of Botany», 112 (2), pp. 277-290.
- CARMINATI A., BENARD P., AHMED M.A. & ZAREBANADKOUKI M. (2017): *Liquid bridges at the root-soil interface*, «Plant and Soil», 417 (1), pp. 1-15.
- CHABOUD A. (1983): *Isolation, purification and chemical composition of maize root cap slime*, «Plant and Soil», 73, pp. 395-402.
- CHENU C., GUÉRIF J. (1991): *Mechanical strength of clay minerals as influenced by an adsorbed polysaccharide*, «Soil Sci. Soc. Am. J.», 55, pp. 1076-1080.
- DENG W., HALLETT P.D., JENG D.S., SQUIRE G.R., TOOROP P.E., IANNETTA P.P.M. (2015): *The effect of natural seed coatings of Capsella bursa-pastoris L. Medik. (shepherd's purse) on soil-water retention, stability and hydraulic conductivity*, «Plant Soil», 387 (1-2), pp. 167-176.
- DI MARSICO A., SCRANO L., LABELLA R., LANZOTTI V., ROSSI R., COX L., PERNIOLA M., AMATO M. (2018a): *Mucilage From Fruits/Seeds Of Chia (Salvia hispanica L.) Improves Soil Aggregate Stability*, «Plant and Soil», 425 (1), pp. 57-69, doi: 10.1007/s11104-018-3565-1.
- DI MARSICO A., SCRANO L., AMATO M., GÀMIZ B., REAL M., COX L. (2018b): *Mucilage from seeds of chia (Salvia hispanica L.) used as soil conditioner; effects on the sorption-desorption of four herbicides in three different soils*, «The Science of the Total Environment», 625, pp. 531-538, doi:10.1016/j.scitotenv.2017.12.078.

- FAO (2009): Strategic framework 2009-2019 conference report Rome, 18-23 November 2009, 36 pp. <http://www.fao.org/3/k5864e01/k5864e01.pdf>.
- FLOYD R.A. & OHLROGGE A.J. (1971): *Gel formation on nodal root surfaces of Zea mays. Some observations relevant to understanding its action at the root-soil interface*, «Plant and Soil», 34 (1), pp. 595-606.
- GARDI C., BRENNI S., SOLARO S., PIAZZI M., PETRELLA F. (2007): *The Carbon Sequestration Potential of Soils: Some Data from Northern Italian Regions*, «Ital. J. Agron. / Riv. Agron.», 2007, 2, pp. 143-150.
- HALING R.E., BROWN L.K., BENGOUGH A.G., YOUNG I.M., HALLETT P.D., WHITE P.J. & GEORGE T.S. (2013): *Root hairs improve root penetration, root-soil contact, and phosphorus acquisition in soils of different strength*, «Journal of Experimental Botany», 64 (12), pp. 3711-3721.
- HASSAN R., SCHOLES R., ASH N. (2005): *Ecosystems and Human Well-Being: Current State and Trends*, Islandpress, Washington, 948 pp., ISBN 1-55963-227-5.
- KELL D.B. (2011): *Breeding crop plants with deep roots: their role in sustainable carbon, nutrient and water sequestration*, «Annals of Botany», 108 (3), pp. 407-418.
- KROENER E., ZAREBANADKOUKI M., KAESTNER A., CARMINATI A. (2014): *Nonequilibrium-water dynamics in the rhizosphere: how mucilage affects water flow in soils*, «Water Resources Research», 50 (8), pp. 6479-6495, doi:10.1002/2013WR014756.
- LAL R. (2004): *Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security*, «Science», 304, pp. 1623-1627.
- LORENZ K. AND LAL R. (2018): *Soil Carbon Stock*, in *Carbon Sequestration in Agricultural Ecosystems*, Springer, pp. 39-136, DOI:10.1007/978-3-319-92318-5_2.
- MENGA V., AMATO M., PHILLIPS T.D., ANGELINO D., MORREALE F., FARES C. (2017): *Gluten-free pasta incorporating chia (Salvia hispanica L.) As thickening agent: an approach to naturally improve the nutritional profile and the in vitro carbohydrate digestibility*, «Food Chem», 221, pp. 1954-1961.
- MOODY S.F., CLARKE A.E. & BACIC A. (1988): *Structural analysis of secreted slime from wheat and cowpea roots*, «Phytochemistry», 27 (9), pp. 2857-2861.
- MOREL J.L., HABIB L., PLANTUREUX S. & GUCKERT A. (1991): *Influence of maize root mucilage on soil aggregate stability*, «Plant and Soil», 136 (1), pp. 111-119.
- OBER E.S., ALAHMAD S., COCKRAM J., FORESTAN C., HICKEY L.T. ET AL. (2021): *Wheat root systems as a breeding target for climate resilience*, «Theoretical and Applied Genetics», 134, pp. 1645-1662.
- OTHMAN A.A., AMER W.M., FAYEZ M. & HEGAZI N.A. (2004): *Rhizosphere of Sinai desert plants is a potential repository for associative diazotrophs*, «Microbiological Research», 159 (3), pp. 285-293.
- RASSE D.P., RUMPEL C. & DIGNAC M.F. (2005): *Is soil carbon mostly root carbon? Mechanisms for a specific stabilisation*, «Plant and Soil», 269 (1), pp. 341-356.
- RICHARDS R.A. AND PASSIOURA J.B. (1989): *A breeding program to reduce the diameter of the major xylem vessel in the seminal roots of wheat and its effect on grain yield in rain-fed environments*, «Australian Journal of Agricultural Research», 40, pp. 943-950.
- ROOSE T., KEYES S.D., DALY K.R., CARMINATI A., OTTEN W., VETTERLEIN D. & PETH S. (2016): *Challenges in imaging and predictive modeling of rhizosphere processes*, «Plant and Soil», 407, pp. 9-38.
- RUSSELL E.W (1986): *Russell's Soil Conditions and Plant Growth*, Longman, Harlow.
- TRAORÉ O., GROLEAU-RENAUD V., PLANTUREUX S., TUBEILEH A. & BOEUF-TREMBLAY V.

- (2000): *Effect of root mucilage and modelled root exudates on soil structure*, «European Journal of Soil Science», 51 (4), pp. 575-581.
- UNITED NATIONS GENERAL ASSEMBLY (2015): *Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development*, Resolution adopted by the General Assembly on 25 September 2015 n. 70.1 15-16301 (E) pp 35, <https://undocs.org/A/RES/70/1>.
- WANG C., ZHANG X., LIU J., WANG B., LI Y. & LI Q. (2020): *The profiles and tensile strength on straight roots of plants withstand transient tensile injured after self-repair*, «Scientific Reports», 10 (1), pp. 1-9.
- WATT M., MCCULLY M.E., CANNY M.J. (1994): *Formation and stabilisation of rhizosheaths of Zea mays L. Effect of soil water content*, «Plant Physiology», 106, pp. 179-186.
- WULLSTEIN L.H. (1980): *Nitrogen fixation (acetylene reduction) associated with rhizosheaths of Indian ricegrass used in stabilization of the Slick Rock, Colorado tailings pile*, «Rangeland Ecology & Management/Journal of Range Management Archives», 33 (3), pp. 204-206.
- WULLSTEIN L.H., BRUENING M.L. & BOLLEN W.B. (1979): *Nitrogen fixation associated with sand grain root sheaths (rhizosheaths) of certain xeric grasses*, «Physiologia Plantarum», 46 (1), pp. 1-4.
- ZHANG Z., PONG X. (2021): *Bio-tillage: A new perspective for sustainable agriculture*, «Soil & Tillage Research», 206, 104844.

ROSARIO DI LORENZO¹, STEFANO PUCCIO¹

Le radici del vigneto italiano: passato, presente, futuro

¹ Dipartimento di Scienze Agrarie, Alimentari e Forestali, Università degli Studi di Palermo

Nell'accingersi a riflettere su quali saranno le radici – in senso letterale o figurato – della viticoltura del nostro Paese, o per meglio dire quali dovrebbero essere nei prossimi decenni, è fondamentale tenere in conto i fattori che nel corso della storia hanno determinato, per necessità o per opportunità, le scelte che hanno portato all'odierno utilizzo dei portinnesti e alla maggiore diffusione di alcuni di questi nei vigneti italiani.

Fino all'agosto del 1879, data della prima nota ufficiale sulla presenza della fillossera (*Daktulosphaira vitifoliae*, Fitch.) in Italia, la viticoltura del nostro Paese, così come dell'intero continente europeo, si caratterizzava per piante con apparati epigeo e ipogeo costituiti unicamente dalla specie *Vitis vinifera* (viticoltura pre-fillosserica). La vite veniva quindi propagata per via vegetativa mediante talea e propaggine e l'innesto era praticato solamente per la sostituzione di piante improduttive o nella necessità di rimpiazzare varietà risultate poco idonee alla coltivazione in determinati ambienti pedo-climatici.

L'avvento dell'afide dal Nord America a mezzo di piante infette d'importazione, sebbene rischiasse di mettere in ginocchio la viticoltura europea, e con questa interi apparati socio-economici, spinse le autorità scientifiche e governative di quegli anni a un'azione comune senza precedenti finalizzata al contrasto di quello che probabilmente era l'evento più nefasto che avesse mai minacciato i vigneti fino a quel momento. Infatti, dopo i vani tentativi di contrastare la fillossera in maniera diretta, con la contrapposizione di chi sosteneva la necessità di estirpare le piante infette, chi di contrastarla chimicamente (si ricordi il largo uso di solfuro di carbonio) o meccanicamente attraverso la sommersione dei vigneti, si colse l'opportunità di utilizzare le specie di origine americana per la costituzione di ibridi *produttori diretti* (strada che non diede risultati soddisfacenti) ma soprattutto di portinnesti sui quali poter

innestare le varietà già coltivate nel nostro Paese e mantenere la produzione di vino in Europa. Da lì ebbe inizio una nuova era per la viticoltura (viticoltura post-fillosserica): studiosi provenienti dall’America e dalla Francia, Paesi loro malgrado inizialmente responsabili della diffusione dell’afide, collaborarono proficuamente con quelli italiani, ungheresi, spagnoli, svizzeri, portoghesi, per la larga sperimentazione di nuove varietà di portinnesto che potessero adattarsi con buoni risultati alle diverse condizioni e ai diversi scopi produttivi. Ecco che da una necessità la viticoltura rinasceva con ben nuove opportunità. Il portinnesto, le radici dunque, si ergevano a simbolo di questa rinascita.

Ad oggi si stima che oltre l’85% della viticoltura mondiale sia innestata e le varietà più utilizzate siano tra le settanta e le ottanta; tuttavia, solo dieci di queste rappresentano il 90% di quelle più largamente diffuse (Ollat et al., 2016). Inoltre, nonostante siano conosciute oltre trenta specie del genere *Vitis*, quelle utilizzate per la costituzione di portinnesti si riduce a otto (*V. berlandieri*, *V. rupestris*, *V. vinifera*, *V. riparia*, *V. candicans*, *V. champini*, *V. solonis*, *V. caribea*), nove se si considera la *Vitis rotundifolia* appartenente al sottogenere *Muscadinia*. Da queste sono stati selezionati nel corso degli anni sia ibridi semplici (specie americana x specie americana o specie americana x *V. vinifera*) o complessi (specie americana x specie americana x *V. vinifera*).

Nel Registro Nazionale delle varietà di Vite, nella sezione “portinnesti”, sono iscritte 46 varietà: il 71,8 % è stato iscritto tra il 1971 e il 1990; il 13% tra il 1991 e il 2010 e il 15,2% (7 portinnesti) dopo il 2010, grazie agli sforzi delle università di Milano, Bologna e di Pannonia con i quattro ibridi M, gli Star 50 e 74, i Georgikon 28 e Kober 5BB (fig. 1).

I portinnesti utilizzati nel 2019 per l’impianto dei vigneti con barbatelle selvatiche (dati del Servizio Nazionale Certificazione Vite) sono principalmente ibridi di *V. berlandieri* x *V. rupestris*, come 140Ru (58,8%), 1103P. (25,4%) e 775 P. (4%), mentre per la produzione di barbatelle innestate il vivaismo nazionale ha utilizzato come portinnesto ibridi *V. berlandieri* x *V. riparia* tra cui Kober 5BB (33,2%), SO4 (16,8) e il 420A (2,9%) oltre che ibridi *V. berlandieri* x *V. rupestris* come 1103P. (21%), 110R (13,3%) e 140Ru. (4,8%) (fig. 2).

Riportare questi dati aiuta a comprendere come il “nuovo” vigneto italiano, impiantato nel 2019, abbia utilizzato per oltre il 90% soltanto sette varietà di portinnesti, tutte selezionate tra il 1869 e il 1920 ed iscritte nel Registro nazionale nel 1971. Considerazioni simili possono essere fatte per la viticoltura francese, dove il 61% delle varietà iscritte è rappresentato da ibridi di *V.berlandieri*, *V.riparia*, *V.rupestris* e *V.vinifera* e il 50% circa dei portinnesti utilizzati è rappresentato dai soli SO4, 110 R, 3309 (Fonte: planetgrape. planet-project.org).

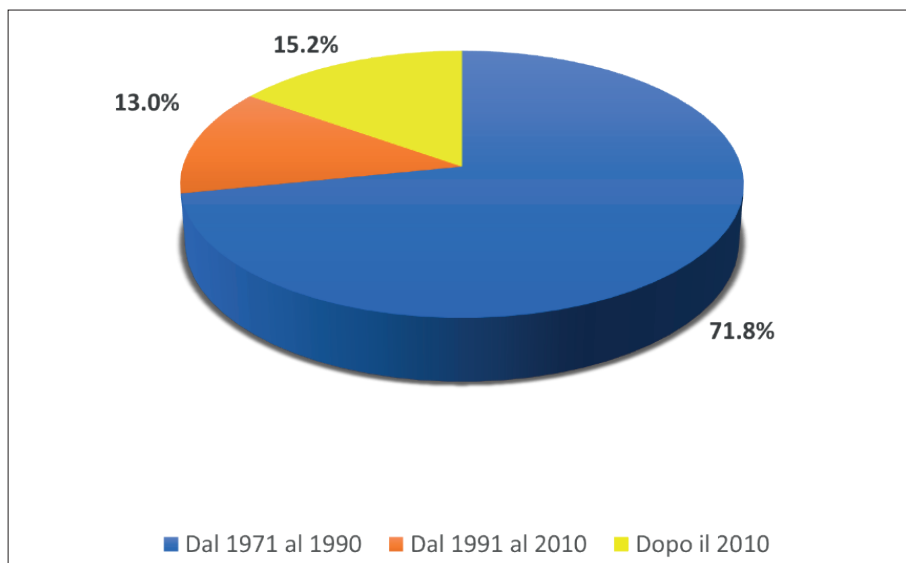


Fig. 1 *Iscrizione dei portinnesti al Registro Nazionale dagli anni '70 (Fonte: Registro Nazionale delle Varietà di Vite)*

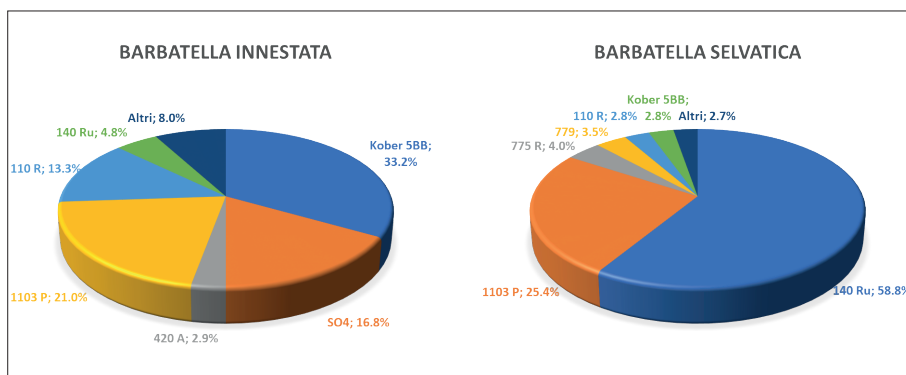


Fig. 2 *Portinnesti più utilizzati nella viticoltura italiana (Fonte: Registro Nazionale delle Varietà di Vite)*

Ciò solleva inevitabilmente parecchi quesiti e riflessioni: la componente genetica dell'apparato radicale del nuovo vigneto italiano è idonea per le sfide della viticoltura del prossimo ventennio? Le problematiche poste dal cambiamento climatico, dalle esigenze di sostenibilità del sistema viticolo, dalla necessità di raggiungere obiettivi produttivi diversi e di garantire alla viticoltura una capacità competitiva rispetto ad altri comparti produttivi, possono essere

affrontate in modo efficace con portinnesti selezionati nel secolo scorso per necessità assai differenti da quelle che si palesano attualmente?

È ovvia la necessità per il comparto di tornare a porre grande attenzione al portinnesto e quindi all'apparato radicale della vite, ricordando che già Democrito (460-370 a.C.) sosteneva: «Gli alberi possono essere paragonati ad uomini capovolti, con la testa infissa nel suolo e i piedi in aria», le radici dunque sono il centro di comando. La ricerca riconosce il ruolo potenziale del portinnesto sulla fenologia, sullo sviluppo vegetativo delle piante, sull'adattamento e sulle risposte a differenti condizioni abiotiche e biotiche, sull'assorbimento e traslocazione di acqua e nutrienti, gli effetti sul microbioma e sulla quantità e qualità delle produzioni. Oggi c'è la consapevolezza, come è dimostrato da progetti di ricerca nazionali (Progetto Ager Serres, Università di Milano e di Bologna, Vivai Cooperativi Rauscedo) e internazionali, attività editoriali (*VINIFERA-Ripartiamo dalle Radici* edizione AssoEnologi) e simposi (*Proceedings of the I International Symposium on Grapevine roots*, ISHS 2016) di riprendere gli studi sui portinnesti. Il portinnesto è uno strumento agronomico di elevato valore per dare risposte alle attuali problematiche della viticoltura supracitate.

Risulta quindi fondamentale avviare programmi di ricerca mirati allo studio dei portinnesti già selezionati, alla valorizzazione della variabilità inter- ed intra-specifica, ma anche porre attenzione al miglioramento genetico servendosi di nuove metodologie, come l'utilizzo di marcatori molecolari e le potenzialità che da esse derivano, senza dimenticare l'importanza della valutazione in campo delle nuove selezioni. A tale scopo quindi la realizzazione di parcelle sperimentali in differenti condizioni bio-agronomiche adottando protocolli rigorosi e condivisi e da qui un'analisi dei dati acquisiti attraverso il confronto fra ricercatori che mettano insieme diverse competenze e sviluppando programmi Nazionali che vedano partecipi tutti gli Attori della Filiera vitivinicola.

ABSTRACT

The "roots" of the Italian vineyard: past, present and future. Until 1879, year of the first reported phylloxera (*Daktulosphaira vitifoliae* Fitch.) infestation in Italy, the vine plants were vegetatively propagated by cutting and offshoot (pre-phylloxera viticulture).

Grafting was practiced only to replace unproductive plants or unsuitable varieties. The vines were therefore characterized by having a root and aerial system of the same species: *Vitis vinifera*.

Post-phylloxera viticulture, on the other hand, was characterized by the genetic diversity between the root system, in which is also present genetic material of species of the genus

Vitis of American origin, and the aerial system, still represented by *Vitis vinifera*. To date, over 85% of world viticulture is grafted and only 10 varieties of rootstocks represent 90% of the total rootstocks used. In the Italian National Register of Vine Varieties are registered 46 varieties of rootstocks: 71.8% were registered between 1971 and 1990; 13% between 1991 and 2010 and 15.2% (7 rootstocks) after 2010. The rootstocks used in 2019 for planting vineyards (data from SNCV, National Vine Certification Service) are 140Ru, 1103P, and 775P, inter-specific crosses of American species *V. berlandieri* x *V. rupestris*. For the production of grafted cuttings instead, the national nursery used Kober 5BB, SO4 and 420A (*V. berlandieri* x *V. riparia*) and 1103P, 110R and 140Ru (*V. berlandieri* x *V. rupestris*). So the “Roots” of the new Italian vineyard, planted in 2019, used over 90% of only 7 varieties of rootstocks, all selected between 1869 and 1920 and registered in the Italian National Register of Vine Varieties in 1971. Similar considerations can be made for French and Spanish viticulture. These data inevitably raise reflections and doubt: is the genetic component of the root system of the new Italian vineyard suitable for the viticulture challenges of the next twenty years? Can the problems deriving from climate change, from the need for sustainability, from the need to achieve different production objectives be dealt effectively with rootstocks selected in the last century? And can it guarantee the competitiveness of viticulture compared to other production sectors? It is obvious the need to re-focus on rootstock and, therefore, to the root system of the vine.

The research recognizes the role of rootstocks on phenology, vegetative development of plants, adaptation and responses to different abiotic and biotic conditions, absorption and translocation of water and nutrients, effects on the microbiome and the quantity and quality of productions. Today there is awareness, as demonstrated by national research projects and international publishing activities and Symposiums to resume studies on rootstocks. It is therefore urgent for Italian viticulture to start research and genetic improvement programs on rootstocks in order to identify, establish and register new varieties of rootstocks, study rootstocks already constituted but not used by grapevine nurseries, enhance the wide but little explored inter- and intra-specific variability of genus *Vitis* and adopt the most modern technologies of breeding and evaluation of accessions by developing National programs that involve all the necessary skills and all the actors of the wine sector.

REFERENZE BIBLIOGRAFICHE

- AA.VV. (2019): *Vinifera, ripartiamo dalle radici*, Assoenologi.
 LENTINI R. (2015): *L'invasione silenziosa. Storia della fillossera nella Sicilia dell'800*, Torri del vento Edizioni.
 OLLAT N., TOUZARD J.M. e VAN LEEUWEN C. (2016): *Climate change impacts and adaptations: New challenges for the wine industry*, «Journal of Wine Economics», 11 (1), pp. 139-149.

MARCO NUTI¹, LAURA ERCOLI¹

La società invisibile e le radici delle piante coltivate

¹ Scuola di Studi Superiori Sant'Anna, Pisa

Anche se si parlava di salute del suolo già nel 1948 all'Accademia dei Georgofili, in occasione della inaugurazione dei lavori della FAO, bisogna arrivare al 1995 per trovare i primi tentativi di definizione di questo concetto (Warkentin, 1995). Negli ultimi 15 anni è apparso sempre più chiaro che esiste una relazione tra salute (spesso detta anche qualità) del suolo, salute delle piante e salute dell'uomo. Ciò grazie alle acquisizioni dei metodi di studio del microbiota e del microbioma di piante ed animali (uomo incluso) che hanno consentito di cominciare a definirne i tre parametri caratterizzanti: la densità, la diversità e la funzionalità. È così che è emerso il concetto di One Health che unisce la salute del pianeta con la salute umana (Atlas, 2013; Wolf, 2015; Destoumieux-Garzón et al., 2018), passando attraverso l'intera catena alimentare come sottolineato da Bevivino et al. (2020). Il microbioma del suolo, dell'interfaccia suolo/pianta e delle piante sono essenziali per la salute delle piante e per una produzione primaria sostenibile (McGully, 2012; McNear, 2013; Xiong et al., 2020; Nuti, 2021).

Per quanto riguarda la densità del microbiota, nell'interfaccia suolo/pianta, cioè in rizosfera (inclusa la rizoplanea) si raggiungono in media 10^{10} - 10^{11} cellule per grammo di terreno, circa due-tre logaritmi in più rispetto al suolo non rizosferico. Questa densità è seconda, nella biosfera, soltanto alla densità del microbiota intestinale umano, che raggiunge 10^{13} cellule per grammo di fluido intestinale. I microrganismi nel suolo e nella rizosfera, come in fillosfera, caulosfera, spermatosfera, necrosfera, non vivono mai da soli (Selosse, 2019) ma in micro- o macrocolonie formate dagli stessi individui o da cellule di specie o generi diversi. La loro diversità è alla base della loro funzionalità, nel senso che quanto maggiore è la diversità del microbiota tanto maggiore è la loro capacità di svolgere bene le loro funzioni, potendo all'occorrenza mutuare le

funzioni di una sottopopolazione che dovesse soccombere per uno stress ambientale o nutrizionale. La salute o qualità del suolo può esser definita come la «capacità continua del suolo a funzionare come un ecosistema vivente che sostiene piante, animali ed esseri umani» (National Resources Conservation Service, 2019 <https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/main/soils/health/>) senza diventare degradato o capace di danneggiare l'ambiente (Warkentin, 1995; Buneman et al., 2018).

I parametri per definire lo stato di «salute» di un terreno agrario, sempre in relazione ad una zona pedo-climatica e alla gestione agronomica (E.K. Bunemann, www.isqaper-project.eu, 2016-2020) sono le proprietà (a) chimiche (pH, C, N, P, S, micro-elementi, sostanza organica); (b) fisiche (tessitura, macro- e micro-aggregati); (c) biochimiche (attività enzimatiche) e (d) biologiche: microbiota (densità, composizione, struttura). Particolare attenzione dovrà essere posta alla relazione esistente tra gli aggregati (macro-, micro-aggregati e micro-aggregati occlusi) in quanto la presenza del microbiota è maggiore a livello di questi ultimi due, sia per i microrganismi eucarioti che procarioti (Piazza et al., 2019).

Gli articoli scientifici sulla identificazione tassonomica di membri del microbiota sono in continua crescita dal 2007 ad oggi, grazie alle nuove tecniche di sequenziamento del DNA e della metagenomica (Chu et al., 2020). Anche se la composizione del microbiota terricolo e rizosferico non può considerarsi compiutamente descritta, già appare che sia nel terreno che in rizosfera vi sono comunità “core” che caratterizzano tipi di gestione agronomica diversi. Queste comunità sono sia batteriche che fungine e possono essere associate al profilo e al tipo di aggregati del terreno, a determinati cicli biogeochimici come quello del carbonio, dell'azoto o dello zolfo, oppure alle rese di colture in pieno campo (Piazza et al., 2019, 2021). Anche se i dati disponibili sono limitati ad alcune colture e ottenuti in sistemi controllati, la composizione e il funzionamento del microbioma iniziale di un terreno possono predeterminare la salute delle piante che vi vengono coltivate: utilizzando rhizobox e piante di pomodoro, Wei et al. (2019) hanno trovato che nel suolo dove sono cresciute piante sane vi è una preponderanza di Alphaproteobacteria, Firmicutes e Cyanobacteria, mentre nello stesso tipo di suolo dove sono cresciute piante malate vi è una preponderanza di Acidobacteria, Actinobacteria e Verrucomicrobia.

L'utilizzazione di particolari elaborazioni grafiche come l'analisi netshift consente oggi di descrivere le interconnessioni positive o negative che intercorrono tra le varie unità tassonomiche, facendo intravedere la possibilità di gestire agronomicamente le complesse relazioni tra gruppi microbici diversi tra loro. Alla base di queste interazioni non bisogna dimenticare che i microrganismi parlano tra di loro e reagiscono ai segnali che ricevono, parlano

alle piante soprattutto all'interfaccia del suolo con la radice e reagiscono ai segnali che le piante inviano, parlano agli organismi animali e reagiscono ai segnali che questi mandano loro. I linguaggi dei microbi comprendono innanzitutto parole o segnali biochimici quali acil- e aril-omoserina delta lattoni (per il quorum sensing cioè per segnalare all'interno di una popolazione i pericoli esterni o una maggior disponibilità di cibo), acetil-glucosammina e lipo-chito-oligosaccaridi (nella conversazione molecolare tra rizobi e piante leguminose), fito-ormoni, alfa-pirone, dialchil-resorcinoli, i composti volatili. Ma comunicano tra loro anche con i suoni (emissione di onde sonore in *Bacillus subtilis* tra 8 e 43 kHz con picchi a 8.5, 19, 29 e 37 kHz), con l'emissione di luminescenze (l'ossidazione di una aldeide alifatica a lunga catena e di flavin-mononucleotide ridotto genera energia in eccesso che viene dissipata come bioluminescenza verde/blu a 490 nm), con l'elettricità (trasferimento di elettroni extracellularmente in ambienti poveri o senza ossigeno). È così che i rizobi possono formare noduli azotofissatori sulle radici delle leguminose sia da foraggio che da granella, è così che oltre l'80% delle piante nella biosfera entra in simbiosi con i funghi micorrizici. È così che in natura le termiti possono degradare la ligno-cellulosa e nutrire le regine del termitaio con l'indispensabile apporto del microbiota intestinale rappresentato da batteri attinobatteri e microfunghi (Pasti et al., 1990) o i ruminanti far funzionare il microbioma simbiote per la loro nutrizione (Wolf e Metcalf, 2005). È così che gli esseri umani comunicano attraverso il nervo vago con il microbioma intestinale che, formato da un numero di cellule superiore di un logaritmo rispetto alle cellule che compongono l'intero corpo umano, rappresenta il nostro secondo cervello.

Le alterazioni o disbiosi del nostro microbioma sono collegate ormai con una ventina di stati patologici (Johnson, 2020) e il malfunzionamento o alterazione del microbioma intestinale potrebbe essere strettamente collegato con una disfunzione dei sistemi di comunicazione tra il micro- ed il macro-simbiote. Il legame tra microbioma e l'ospite simbiote è così stretto che si parla di co-evoluzione del microbioma intestinale, come nel caso della tartaruga *Caretta caretta* (Scheelings et al., 2020).

Ecco che ormai si parla in tutti questi casi di olo-bionti, siano essi piante o animali, cioè di super-organismi formati in modo stabile da più organismi con funzioni complementari tra loro. In agricoltura, alcune di queste simbiosi forniscono servizi ecosistemici di notevole rilevanza economica: si calcola che l'azotofissazione simbiotica delle leguminose fornisca ogni anno su scala globale 40 milioni di tonnellate di azoto per un valore economico di 63 miliardi di dollari US (GRDC, 2012, www.coretext.com.au).

L'uso dei microrganismi in agricoltura è un mezzo di produzione consolidato nel tempo: per i rizobi dal 1896, per *Bacillus thuringiensis* dal 1937, per i funghi micorrizici dalla metà del secolo scorso. Il solo mercato dei microrganismi usati come biopesticidi è di oltre 70 miliardi di dollari US su base annuale. Studi nell'area mediterranea mostrano con chiarezza che i vantaggi agronomici dell'uso dei rizobi, come promotori di crescita, sono notevoli anche su cereali (Yanni et al., 2016). Non sono disponibili, su scala globale, i valori economici dei servizi ecosistemici forniti dai funghi micorrizici, anche se è presumibile che essi superino quelli limitati alla sola azotofissazione simbiotica dei rizobi, considerando l'estensione della simbiosi micorrizica nella biosfera. In uno studio di meta-analisi, Pellegrino et al. (2015) hanno messo in evidenza che l'inoculo del frumento con funghi micorrizici come biofertilizzanti permette l'aumento significativo di: parte aerea, paglia, granella, indice di raccolta, fosforo della parte aerea e della paglia, concentrazione e contenuto dell'azoto della parte aerea, azoto e zinco della granella.

E veniamo ai cambiamenti climatici. Questi consistono principalmente in aumento del riscaldamento globale, alterazioni delle precipitazioni, aumento di emissioni di anidride carbonica, cambio d'uso del territorio, deposizione di azoto dall'atmosfera, aumento di nutrienti (eutrofizzazione). Potremmo immaginare questi cambiamenti come rappresentati da ingranaggi di una macchina complessa (l'ambiente della biosfera): quando s'innesca il movimento di un ingranaggio, anche gli altri sono costretti a muoversi, e tutti insieme possono influenzare ed essere influenzati dal microbiota terricolo. I biota del suolo e della pianta influiscono sugli ecosistemi (Wagg et al., 2019) soprattutto per quanto riguarda gli effetti della perdita di biodiversità: viene da un lato comprovata l'importanza delle interazioni microbiche all'interno e tra le comunità batteriche e fungine per l'aumento della funzionalità degli ecosistemi e dall'altro viene dimostrato che l'estinzione delle complesse associazioni nel terreno può danneggiare il funzionamento dell'intero ecosistema. Trivedi et al. (2016) hanno dimostrato con uno studio di meta-analisi che l'intervento antropico, come la gestione agronomica, influisce significativamente sul microbiota.

L'avanzamento delle conoscenze sulla metagenomica del suolo e gli studi spaziali delle comunità microbiche e delle caratteristiche molecolari delle comunità microbiche possono essere utilizzate come bio-marcatori dei processi ecosistemici per monitorare e gestire la salute del suolo in una situazione di cambiamenti globali. Lo studio ha evidenziato una decisa tendenza statistica dell'abbondanza relativa di diversi *phyla* batterici in sistemi agricoli, ad esempio l'aumento di Actinobacteria e Chloroflexi, nei confronti di sistemi naturali, con l'aumento di Acidobacteria, Proteobacteria e Cyanobacteria; queste tendenze significative sono correlate con molti parametri fisico-chimici del

suolo, anche se gli effetti della gestione agronomica sulle proprietà del suolo e sulla produttività sono bioma-dipendenti. Infine un altro recente, accurato studio di meta-analisi (Zhou et al., 2020) dimostra che i cambiamenti climatici influiscono sulla diversità e funzionalità del (micro)biota suolo/pianta. Sono stati analizzati 1235 fattori di cambiamento globale (FCG) ed è emerso che le specie microbiche rare sono più sensibili ai FCG rispetto alle specie comuni, mentre non sempre questi fattori portano ad una riduzione della diversità microbica. I cambiamenti indotti dai FCG per l'alfa-diversità microbica possono essere interpretati come effetto del cambiamento del pH del suolo. Inoltre l'impatto dei FCG sulla funzionalità dipendono dalla struttura delle comunità microbiche e dalla biomassa piuttosto che dall'alfa-diversità. Questi nuovi risultati forniscono una chiave per le politiche di conservazione della biodiversità microbica in una situazione di cambiamento globale.

Speriamo che altri elementi decisionali si aggiungano ai molti già esistenti e che i *decision-makers* basino sempre più le loro scelte politiche sui dati che la scienza offre, in modo da non trovarsi nella scomoda posizione di ragionare con la testa già semi-sommersa nell'acqua come ben rappresentato dalla scultura del 2021 di Isaac Cordal che si trova a Berlino e si intitola *Politici che discutono sul cambiamento climatico*.

È per tutti questi fattori d'incertezza o (in)colpevole ritardo che riteniamo proporre l'adozione sollecitata della "Carta dei diritti dei microbi" (Nuti, 2021) che riporta i seguenti punti: (1) Il diritto ad esistere in quanto esseri viventi: i microbi sono esseri viventi al pari di tutti gli altri esseri viventi ed hanno pari diritti degli altri esseri viventi, il primo dei quali è quello di essere liberi di esistere. (2) Il diritto alla salute dei comparti ambientali: i microbi hanno il diritto, al pari di tutti gli altri esseri viventi, alla loro salute nell'ambiente nel quale vivono, nei suoi comparti ambientali e cioè suolo, acqua ed aria, senza essere minacciati dalla immissione di composti non degradabili o tossici. (3) Il diritto alla pacifica convivenza con i bioti vegetali: per miliardi di anni i microbi hanno vissuto contribuendo all'evoluzione di forme di vita più complesse e alla salute di queste forme di vita. Pertanto i microbi hanno il diritto di poter convivere con le piante, con le quali hanno stabilito, fin dalla comparsa di queste ultime sul nostro pianeta, rapporti di convivenza e di cooperazione, aiutandole a nutrirsi e crescere in salute. (4) Il diritto alla pacifica convivenza con i bioti animali: i microbi hanno il diritto di poter convivere con tutti gli animali, con i quali hanno stabilito, fin dalla comparsa di questi ultimi sul nostro pianeta, rapporti di convivenza e di cooperazione, aiutandoli a nutrirsi (dalle termiti ai ruminanti agli esseri umani) e a crescere in salute. (5) Il diritto alla pacifica convivenza con i bioti microbici: i microbi hanno il diritto di poter convivere con tutti gli altri microorganismi, con i quali hanno

stabilito rapporti di convivenza e cooperazione nella dinamica dei cicli biogeochimici su questa Terra, nella trasformazione delle rocce in terreno, nell'agire da promotori di tutte le catene alimentari, nell'agire da promotori delle trasformazioni delle materie prime in alimenti.

RIASSUNTO

Che da piante sane possa dipendere una sana alimentazione per gli animali e gli esseri umani è considerato intuitivo. Ma che la salute e benessere delle piante dipenda dalla salute e benessere del suolo è concetto sostanziato sperimentalmente in tempi recenti, in particolare per quel che riguarda l'interfaccia tra il suolo e le radici delle piante. Infatti, mentre la cognizione della predisposizione del suolo ad ospitare la crescita delle piante coltivate risale ad almeno 6000 anni fa (i libri cinesi *Yugong* e *Zhouli* scritti durante le dinastie Xia e Zhou; Harrison et al, 2010) e si arricchisce durante la civiltà egizia e quella romana, è solo dagli anni '90 del secolo scorso che s'incomincia a parlare di "salute" del suolo, riferita anche come "qualità" del suolo. Il termine "salute del suolo" ha la sua origine nella osservazione che la qualità del suolo influenza la salute umana ed animale attraverso la qualità delle colture agrarie (Warkentin, 1995). Essa può esser definita come la "capacità continua del suolo a funzionare come un ecosistema vivente che sostiene piante, animali ed esseri umani" (National Resources Conservation Service, 2019 <https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/main/soils/health/>) senza diventare degradato o capace di danneggiare l'ambiente (Buneman et al., 2018). I parametri per definire lo stato di "salute" di un terreno agrario (sempre in relazione ad una zona pedo-climatica ed alla gestione agronomica; E.K. Bunemann, www.isqaper-project.eu, 2016-2020) comprendono le proprietà: chimiche (pH, C, N, P, S, micro-elementi, sostanza organica), fisiche (tessitura, macro- e micro-aggregati), biochimiche (attività enzimatiche) e quelle biologiche (densità, composizione, struttura del micro- meso- e macro-biota, densità e biodiversità delle sotto-popolazioni). L'interfaccia suolo/pianta consente ad una sotto-popolazione del microbiota terricolo, dopo un intensissimo scambio di segnali bio-molecolari con le radici emergenti, di colonizzare la pianta stessa a livello di radice (rizoplane, endo- ed eso-rizosfera), di caule (endo- ed eso-caulosfera), di foglie (endo- ed eso-fillosfera). Si ritiene oggi che il ruolo degli endofiti sia da rivalutare rispetto al passato, soprattutto in termini di contributo alla difesa e nutrizione della pianta, tanto che quest'ultima è considerata un olo-bionte, cioè un super-organismo formato da due diverse entità biotiche, il vegetale e il microbiota. Questa nuova visione è sostanziata dalle evidenze che il microbiota induce variazioni essenziali di espressione genica nel vegetale, quand'anche non si consideri che i microrganismi sono capaci di trasmettere nuove informazioni genetiche alla pianta, trasformandole. In quali termini queste interazioni biocenotiche si traducono in una concreta gestione agronomica sostenibile? In un quadro di un'agricoltura che deve sostenere una domanda crescente di cibo, sia in quantità che qualità, nella metà nascosta degli ecosistemi e cioè i terreni agrari, la rizosfera è la parte più attiva di questa frontiera, nella quale i processi biogeochimici influenzano la nutrizione della pianta e il biota terricolo determina la capacità della pianta a reagire agli stress ambientali (ad es. i cambiamenti climatici) e biotici (ad es. i fitopatogeni) (McNear, 2013). Sfida epocale per specialisti agronomi, chimici, economisti, fisiologi, genetisti, microbiologi, sociologi e per la società

civile in generale. Considerando che sia per il biota terricolo che per le interazioni pianta-microorganismi sono la cooperazione e l'interazione funzionale a prevalere, indicherei come prioritarie per la ricerca le aree della selezione di sistemi colturali in grado di potenziare l'accumulo di carbonio, la sua protezione fisica nel terreno e, congiuntamente, della selezione di piante con sistemi radicali che meglio rispondono agli stimoli microbici ed interagiscono con i microorganismi rizosferici. Se riusciremo a riportare i terreni agrari ad un maggior stato di "salute", a coltivare piante sane e ben dotate di principi nutrizionali appropriati, forse potremo affrontare la salute umana ed animale con una prospettiva di vera sostenibilità ambientale.

ABSTRACT

It is an intuitive concept that healthy nutrition for animals and humans depend on healthy plants. But only recently it was experimentally substantiated that the health and well-being of plants depends on the health and well-being of the soil, and specifically of the interface between the soil and the roots of plants. While the concept of the ability of soil to sustain cultivated plants dates back to at least 6000 years ago (the Chinese books *Yugong* and *Zhouli* written during the Xia and Zhou dynasties; Harrison et al, 2010) and is further supported and extended during the Egyptian civilization and the Roman one, it is only from the '90s of the last century that we began to talk about soil "health", also referred to as soil "quality". The term "soil health" originates from the observation that soil quality affects human and animal health through the quality of agricultural crops (Warkentin, 1995). It can be defined as the "continuous capacity of the soil to function as a living ecosystem that supports plants, animals and humans" (National Resources Conservation Service, 2019 <https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/main/soils/health/>) without becoming degraded or capable of damaging the environment (Buneman et al., 2018). The parameters to define the state of "health" "of an agricultural soil (related to a given pedo-climatic area and agronomic management; E.K. Bunemann, www.isqaper-project.eu, 2016-2020) include chemical (pH, C, N, P, S, micro-elements, organic matter), physical (texture, macro- and micro-aggregates), biochemical (enzymatic activities) and biological properties (density, composition, structure of the micro-meso- and macro-biota, density and biodiversity of sub-populations). The soil/plant interface allows a sub-population of the soil microbiota, after an intense exchange of bio-molecular signals with the emerging roots, to colonize the plant itself at the root level (rhizoplane, endo- and exo-rhizosphere), of caule (endo- and exo-caulosphere), of leaves (endo- and exo-phyllosphere). Recent scientific advances have demonstrated the important role endophytes, especially in terms of contribution to plant defense and nutrition. Therefore, plant and associated microbiota can be regarded as a single organism, the "holobiont". This paradigm is substantiated by the evidence that microbiota induces variations of gene expression in the plant, even not considering that microorganisms are capable of transforming plant genome. How these biotic interactions can be translated into concrete and sustainable agronomic management? For an agriculture able to support a growing demand for food, both in quantity and quality, the rhizosphere is the most active part of the hidden half of the ecosystem, i.e. the agricultural soil, where biogeochemical processes influence plant nutrition and soil biota determine the plant ability to adapt to

environmental (e.g. climate change) and biotic (e.g. phytopathogens) stresses (McNear, 2013). These are epochal challenge for agronomists, chemists, economists, physiologists, geneticists, microbiologists, sociologists and for the civil society in general. Considering that cooperation and functional interactions among plants and associated microbiota are essential, research priorities are the selection of cropping systems capable of boosting new C additions and enhancing physical protection of the newly added C, together with the selection of plants with root systems that best respond to microbial stimuli and interact with rhizospheric microorganisms. If we succeed to restore agricultural land to a greater health level, to cultivate healthy plants well equipped with appropriate nutritional principles, perhaps we will be able to face human and animal health with a perspective of true environmental sustainability.

BIBLIOGRAFIA

- ATLAS R.M. (2013): *One health: Its origins and future*, in Mackenzie J., Jeggo M., Daszak P., Richt J. (Eds.), *One Health: The Human-Animal-Environment Interfaces in Emerging Infectious Diseases*, Current Topics in Microbiology and Immunology, vol. 365. Springer, Berlin, Heidelberg, https://doi.org/10.1007/82_2012_223
- BEVVINO A., SONNINO A., ROSSI L. (2020): *Il microbioma dell'agro-ecosistema al servizio della produzione primaria*, <https://www.georgofili.it/Media?c=c4aacf9f-411e-4ee-e-83a3-c9e53547b571>
- BUNEMAN E.K., BUONGIORNO G., BAI Z. ET AL. (2018): *Soil quality – a critical review*, «Soil Biology and Biochemistry», 120, pp. 105-125.
- CHU H., GAO G.-F., MA Y. ET AL. (2020): *Soil microbial biogeography in a changing world: recent advances and future perspectives*, «mSystem», 5:e00803-19. <https://doi.org/10.1128/mSystems.00803-19>
- DESTOUMIEUX-GARZÓN D., MAVINGUI P., BOETSCH G. ET AL. (2018): *The one health concept: 10 years old and a long road ahead*, «Frontiers in Veterinary Science», 5, 14. <https://doi.org/10.3389/fvets.2018.00014>
- HARRISON R., STRAHM B., YI X. (2010): *Soil education and public awareness*, in Verhey W.H. (Ed.), *Soils, plant growth and crop production*, vol. III, Encyclopedia of Life Support System (EOLSS). EOLSS Publ. UNESCO, UK, pp. 196-218.
- JOHNSON K.V.-A. (2020): *Gut microbiome composition and diversity are related to human personality traits*, «Human Microbiome Journal», 15, 100069.
- MCGULLY, M. (2012): *The rhizosphere: the key functional unit in plant/soil/microbial interactions in the field. Implications for the understanding of allelopathic effects*, Division of Plant Industry, Forth World Congress on Allelopathy, The Regional Institute Ltd. Nature Education, Cit da McNear Jr. D.H., *The Rhizosphere - Roots, Soil and Everything in Between*, «Nature Education Knowledge», 4 (3), 1, 2013.
- McNEAR JR. D.H. (2013) *The Rhizosphere - Roots, Soil and Everything in Between*, «Nature Education Knowledge», 4 (3), 1.
- NUTI M. (2021): *Una società invisibile: l'importanza dei microbi in agricoltura*, Carocci Editore, Roma, pp. 1-71, ISBN 978-88-430-7429-7.
- PASTI M.B., POMETTO A.L., NUTI M. ET AL. (1990): *Ligning degrading ability of actinomycetes isolated from termite (Termitidae) gut*, «Applied Environmental Microbiology», 56, pp. 2213-2218.

- PELLEGRINO E., OPIK M., BONARI E. ET AL. (2015): *Responses of wheat to arbuscular mycorrhizal fungi: a meta-analysis of field studies from 1975 to 2013*, «Soil Biology and Biochemistry», 84, pp. 210-217. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.02.020>
- PIAZZA G., ERCOLI L., NUTI M. ET AL. (2019): *Interaction between conservation tillage and nitrogen fertilization shapes prokaryotic and fungal diversity at different soil depths: evidence from a 23-year field experiment in the mediterranean area*, «Frontiers in Microbiology», 10, 2047.
- SCHEELINGS T.F., MOORE R.J., VAN T.T. H. ET AL. (2020): *Microbial symbiosis and coevolution of an entire clade of ancient vertebrates: the gut microbiota of sea turtles and its relationship to their phylogenetic history*, «Animal Microbiome», 2, 17.
- SELOSSE M.A. (2019): *Jamais seuls: ces microbes qui construisent le plantes, les animaux et les civilisations*, Ed. Actes Sud, Les Méjan, Pl. Berberova, 13200 Arles, France.
- TRIVEDI P., DELGADO-BAQUERIZO M., ANDERSON I. C. ET AL. (2016): *Response of Soil Properties and Microbial Communities to Agriculture: Implications for Primary Productivity and Soil Health Indicators*, «Front. Plant Sci.», 7, 990, doi: 10.3389/fpls.2016.00990.
- YANNI Y., DAZZO F.B., SQUARTINI A. ET AL. (2016): *Assessment of the natural endophytic association between Rhizobium and wheat and its ability to increase wheat production in the Nile delta*, «Plant and Soil», doi:10.1007/s11104-016-2895-0.
- XIONG W., SONG Y., YANG K. ET AL. (2020): *Rhizosphere protists are key determinants of plant health*, «Microbiome», 8, 27, <https://doi.org/10.1186/s40168-020-00799-9>.
- ZHOU Z., WANG C., LUO Y. (2020): *Meta-analysis of the impacts of global change factors on soil microbial diversity and functionality*, «Nature Communication», <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16881-7>
- WAGG C., SCHLAEPI K., BANERJEE S. ET AL. (2019): *Fungal-bacterial diversity and microbiome complexity predict ecosystem functioning*, «Nature Communication», <https://doi.org/10.1038/s41467-019-12798-y>
- WARKENTIN B.P. (1995): *The changing concept of soil quality*, «Journal of Soil and Water Conservation», 50 (3), pp. 226-228.
- WEI Z., GU Y., FRIMAN V.-P. ET AL. (2019): *Initial soil microbiome composition and functioning predetermine future plant health*, «Science Adv.», 5, eaaw0759, 25 September 2019.
- WOODLY B., METCALF J.A. (2005): *Understanding Rumen Function*, «Dairy Digest», http://www.shurgain.com/pdf/Winter_2005_DairyDigest.pdf
- WOLF M. (2015): *Is there really such a thing as "one health"? Thinking about a more than human world from the perspective of cultural anthropology*, «Social Science and Medicine», 129, pp. 5-11.

MARIATERESA RUSSO¹

La metà nascosta e la salute dell'uomo: il caso delle nanoplastiche

¹ Università "Mediterranea" degli Studi di Reggio Calabria

Le attività umane sono tra i driver più significativi delle funzioni degli ecosistemi e delle minacce alla biodiversità. Possiamo affermare, senza tema di smentita, che l'influenza antropogenica sul pianeta Terra ha raggiunto livelli paragonabili a quelli dei più imponenti processi geofisici naturali che lo hanno plasmato e, con gli oltre 8 miliardi di tonnellate di plastica prodotta a partire dal 1950 siamo, oggi, dentro una nuova era: il "plasticocene".

Il mondo produce oggi poco meno di 350 milioni di tonnellate di plastica ogni anno, con un tasso di crescita del 5% ogni anno.

In verità la storia di questo incredibile materiale risale al XIX secolo e affonda le sue radici tra il 1861 e il 1862 quando Alexander Parkes, impegnato sulle ricerche sul nitrato di cellulosa, isola e brevetta il parkesine, più noto come xylonite, il primo materiale plastico semisintetico. Nel 1907 il chimico belga Leo Baekeland ottiene per condensazione tra fenolo e formaldeide, la prima resina termoindurente di origine sintetica, che viene brevettata nel 1910 con il nome di bakelite. Nel 1912 il chimico tedesco Fritz Klatte, scopre il processo per la produzione del polivinilcloruro (PVC) e nel 1913, lo svizzero Jacques Edwin Brandenberger, inventa il cellophane, un materiale a base cellulosica e il primo materiale plastico flessibile, trasparente ed impermeabile. Nel 1935 Wallace Carothers sintetizza il nylon (poliammide), materiale che troverà svariate applicazioni tra cui le calze da donna e, da questo momento, l'ascesa delle fibre sintetiche sarà inarrestabile. Gli studi sul nylon supportano quelli di Rex Whinfield e James Tennant Dickson che, nel 1941, brevettano il polietilene tereftalato (PET) utilizzato per la fabbricazione del tessuto noto come *pile*, di molti imballaggi alimentari ivi inclusa la bottiglia in PET brevettata nel 1973 da Nathaniel Wyeth della azienda Du Pont. Negli stessi anni in Germania vengono sviluppati i poliuretani che soppiantarono la gomma e,

dal 1939, vengono industrializzati i primi copolimeri cloruro-acetato di vinile e il cloruro polivinile. Negli anni '50 è la volta della resina melammina-formaldeide (nota come *formica*), ma è la scoperta del polipropilene isotattico da parte di Giulio Natta nel 1954 – prodotto industrialmente a partire dal 1957 con il notissimo marchio “Moplen” – che, di fatto, segna la rivoluzione del nostro comune vivere.

Il nuovo materiale, da quel momento, “corrompe” le nostre vite e domina il nostro quotidiano.

Oggi oltre l'80% delle materie plastiche prodotte sono termoplastiche che si ottengono grazie alla polimerizzazione di monomeri in catene ad alto peso molecolare. Questi polimeri termoplastici sono poi plasmati per i vari usi attraverso processi che ne modificano le proprietà fisiche (es. fusione, estrusione, pellettizzazione) e chimiche attraverso la miscelazione con svariati additivi che vanno dagli antiossidanti ai plastificanti, chiarificanti, coloranti, ecc. aggiunti per conferire le caratteristiche desiderate, a seconda degli impieghi.

È innegabile: la plastica ha cambiato in meglio le nostre vite ma la sua pessima gestione quale rifiuto ha, di fatto, dato la stura alla scrittura di una delle pagine più buie della nostra storia.

La produzione di materie plastiche ha generato una immensa mole di rifiuti e, con essi, un enorme problema di inquinamento e di salute.

Ci sono voluti decenni di sensibilizzazione sullo smaltimento sostenibile dei rifiuti plastici, decenni di racconti sulle conseguenze dell'inquinamento da questi rifiuti, ma è stato determinante l'impatto della rete che, attraverso la condivisione *on line* e via social delle sconvolgenti immagini delle enormi isole di plastica negli oceani e nei mari, delle distese di plastica sulle meravigliose spiagge un tempo incontaminate, delle immagini della fauna, soprattutto marina che soccombe (tartarughe soffocate dalle buste di plastica, cetacei con il ventre pieno di plastica, i gabbiani e foche soffocate da fili di lenza, ecc.) per scuotere le coscienze e far diventare patrimonio condiviso la consapevolezza che la contaminazione dei nostri habitat è una grave minaccia per la vita sul/ del nostro pianeta.

Ma l'inquinamento da macroplastiche – residui di bottiglie, plastiche monouso, reti da pesca – è solo la punta dell'iceberg, perché oggi ciò che davvero intossica il pianeta e tutti i suoi ospiti sono quelle minuscole particelle derivate dalla degradazione e disintegrazione delle macroplastiche e che, in maniera ubiquitaria contaminano l'acqua che beviamo, il cibo che mangiamo e l'aria che respiriamo.

Parliamo della subdola contaminazione da microplastiche (MP) e nanoplastiche (NP), particelle molto resistenti alla (bio)degradazione e che persistono per moltissimo tempo nell'ambiente.

Secondo un rapporto del Programma delle Nazioni Unite per l'ambiente (Unep) ogni chilometro quadrato di oceano contiene in media 63.320 particelle di MP e il Mediterraneo è uno dei mari più inquinati al mondo: qui si concentra il 7% delle MP a livello globale.

Nonostante la gravità del problema, ad oggi non vi è ancora una definizione normativa per la microplastica. Secondo il Regolamento (CE) n. 1907/2006, meglio noto come Regolamento REACH (*Registration, Evaluation, Authorisation and restriction of CHemicals*), per microplastica si intende «un materiale costituito da particelle solide contenenti polimeri, alle quali possono essere stati aggiunti additivi o altre sostanze e dove $\geq 1\%$ p/p di particelle hanno: (i) tutte le dimensioni $1\text{ nm} \leq x \leq 5\text{ mm}$, o (ii), per le fibre, una lunghezza di $3\text{ nm} \leq x \leq 15\text{ mm}$ e un rapporto lunghezza/diametro >3 ».

Il Regolamento REACH non fornisce, invece, disposizioni specifiche per i nanomateriali. La Commissione Europea ha adottato la Raccomandazione del 18/10/2011: «Con nanomateriale s'intende un materiale naturale, derivato o fabbricato contenente particelle allo stato libero, aggregato o agglomerato, e in cui, per almeno il 50% delle particelle nella distribuzione dimensionale numerica, una o più dimensioni esterne siano comprese fra 1 nm e 100 nm».

Al momento, è convenzionalmente riconosciuta la seguente classificazione in quattro classi dimensionali dei rifiuti da plastica, in tutte le forme possibili (frammenti, fibre/filamenti, perle/sfere, fogli di pellicola e pellet):

- macroplastiche ($>200\text{ mm}$);
- mesoplastiche ($5\text{-}200\text{ mm}$);
- microplastiche: particelle di plastica di dimensioni comprese tra $0,1\text{ }\mu\text{m}$ (micron, cioè un millesimo di millimetro, $10\text{-}6\text{ m}$) e 5 mm :
 - a. le microplastiche di medie dimensioni ($1,01\text{-}4,75\text{ mm}$);
 - b. le microplastiche più piccole ($0,33\text{-}1,00\text{ mm}$).
- nanoplastiche: particelle di plastica di dimensioni comprese tra 1 nm ($0.001\text{ }\mu\text{m}$) e 100 nm ($0.1\text{ }\mu\text{m}$ o millimicron, cioè un millesimo di micron; $10\text{-}9\text{ m}$).

Le microplastiche (MP), a loro volta sono classificabili in:

- MP primarie, quelle rilasciate direttamente nell'ambiente sotto forma di piccole particelle. Si stima che questa categoria di microplastiche rappresenti il 15-31% delle microplastiche presenti nell'oceano. Le fonti principali, in ordine decrescente sono: il lavaggio di capi sintetici (35% delle microplastiche primarie) e conseguente rilascio attraverso l'acqua di scarico nell'ambiente; l'abrasione dei pneumatici durante la guida, i cui residui

entrano a far parte del particolato atmosferico che respiriamo ogni giorno (28%); MP aggiunte intenzionalmente nei prodotti per la cura del corpo (es. le micro-particelle aggiunte a scrub facciali ed esfolianti, dentifrici, vernici e prodotti abrasivi ecc.) 2%¹.

- MP secondarie, quelle prodotte dalla degradazione delle macroplastiche (es. buste, bottiglie, stoviglie monouso, flaconi per detersivi e saponi, reti da pesca, ecc.). Queste rappresentano circa il 68-81% delle microplastiche presenti nell'oceano e nei mari. Non ci sorprende quindi che una delle principali fonti alimentari di microplastica secondaria sia rappresentata dal sale marino.

Essendo le MP il frutto della degradazione della plastica, queste sono anche veicolo di diversi altri inquinanti rappresentati dagli stessi additivi delle plastiche, tra cui di grande importanza sono alcune sostanze classificate come “interferenti endocrini” come gli ftalati, utilizzati per rendere più flessibile la plastica e il Bisfenolo A utilizzato per rendere più resistente la plastica dei flaconi dei detersivi o alcune stoviglie monouso. In aggiunta vanno considerati ulteriori contaminanti eventualmente adsorbiti sulla superficie esposta tra cui contaminanti ambientali.

Nel 2017 l'ONU ha dichiarato che nei mari del pianeta sono presenti 51mila miliardi di particelle di microplastica, 500 volte più numerose di tutte le stelle della nostra galassia.

Le quantità di microplastiche presenti negli oceani sono in costante aumento e, per via dell'enormità del problema, l'attenzione della ricerca negli ultimi vent'anni si è concentrata quasi esclusivamente sugli effetti delle MP e NP in ambienti acquatici principalmente marini.

In mare le MP e le NP vengono ingerite dai grandi predatori, cetacei e uccelli e attraverso plancton, da invertebrati e pesci contaminando l'intera catena alimentare.

Attraverso il ben noto fenomeno denominato *biomagnificazione* – che porta a un crescente accumulo di contaminanti passando, progressivamente, dai consumatori primari ai grandi predatori sino all'uomo – il livello di MP/NP che arriva sulle nostre tavole potrebbe assumere dimensioni preoccupanti se, come è stimato, il 15-20% delle specie marine che finiscono sulle nostre tavole sono contaminate.

Ciò ha reso evidente l'esistenza di un grave problema di sicurezza alimentare e salute.

¹ <https://www.europarl.europa.eu/news/it/headlines/society/20181116STO19217/microplastiche-origini-effetti-e-soluzioni>

L'attenzione scientifica sul tema ha dimostrato la gravità degli effetti diretti e indiretti dell'inquinamento da MP/NP sul biota marino, costiero e oceanico e stimolato la riflessione sull'ipotesi che le MP/NP potessero interagire, ancor prima che con il biota marino, con quello della terraferma.

In effetti, la maggior parte dei rifiuti di plastica che arriva negli oceani è prodotta, utilizzata e, spesso, smaltita (male) proprio sulla terraferma.

Il tema dell'inquinamento dei sistemi terrestri da MP/NP è stato oggetto, soprattutto negli ultimi anni, di grande attenzione. In una *opinion* pubblicata su *Global Change Biology*, pubblicata on line 2017 (Abel de Souza Machado et al., 2018), che ha focalizzato gli effetti sulla geochimica, l'ambiente biofisico e l'ecotossicologia, l'inquinamento da MP/NP è stato individuato come fattore di stress tale da indurre un cambiamento globale nei sistemi terrestri.

Nello stesso studio è stato analizzato il destino ambientale delle MP negli habitat terrestri e sono stati messi in evidenza collegamenti rilevanti con i sistemi di acqua dolce. Gli autori hanno analiticamente discusso il tema della tossicità, potenzialmente ad ampio spettro, delle NP sugli organismi terrestri e le potenziali implicazioni ecologiche. Le conclusioni hanno portato alla presa d'atto della onnipresenza di MP/NP negli ambienti terrestri e delle potenziali e deleterie, quanto preoccupanti, conseguenze sull'ecosistema e sulla salute. L'inquinamento da microplastiche è stato individuato come uno dei temi più rilevanti da affrontare per garantire, su scala globale, la conservazione della biodiversità.

Con questa *opinion* viene, finalmente, posta con forza l'urgenza di sviluppare ricerche volte a chiarire il destino ambientale e gli effetti di tali piccole particelle di plastica nei sistemi terrestri.

Lo studio proposto ipotizza che, degli oltre 400 milioni di tonnellate di plastica prodotti a livello mondiale ogni anno, un terzo vada a finire sulla terraferma e nelle acque dolci e dia origine alle MP e NP.

La ricerca analizza anche l'inquinamento da MP nelle acque reflue, evidenziando come queste particelle persistono nei fanghi di depurazione che vengono poi riutilizzati in agricoltura, favorendo in tal modo, ogni anno, il trasferimento di migliaia di tonnellate di plastica nei suoli coltivati. A questa fonte di contaminazione dei terreni si aggiungono le stesse attività agricole che originano microplastiche secondarie a partire da imballaggi, bottiglie, reti pacciamanti, sistemi di irrigazione, contenitori in polistirolo, teli per copertura delle serre, ecc.. Nella figura 1 sono schematizzate le principali vie di contaminazione da MP/NP nei suoli agricoli (Pinheiro Machado Rehm et al., 2018).

Nel 2018 viene pubblicata una *Scientific Opinion* della Commissione Europea (Group of Chief Scientific Advisors, 2019) che pone all'attenzione l'u-

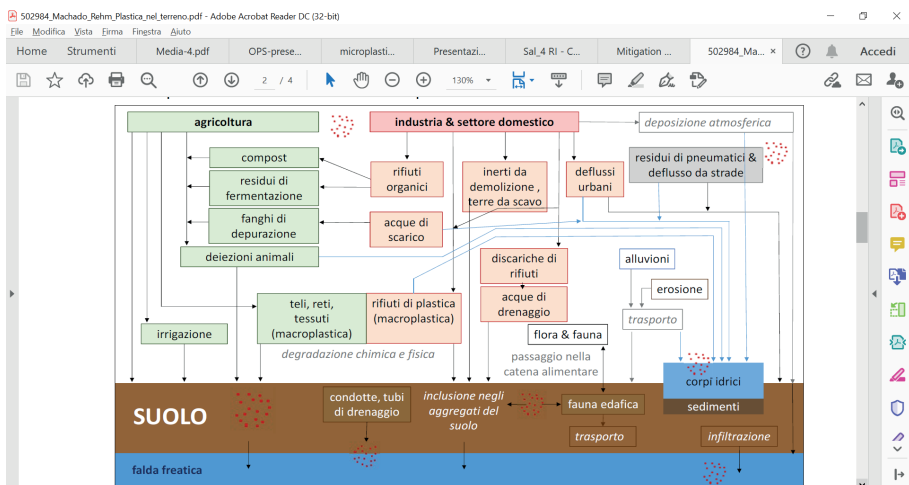


Fig. 1 Principali vie di contaminazione da MP/NP nei suoli agricoli. Fonte: R. Pinheiro et al. - *Plastica nel terreno, un problema ancora sconosciuto in frutti-viticultura*. 2018

biquità delle MP/NP presenti nell'aria, nei sedimenti, nelle acque dolci, nei suoli, negli animali, negli alimenti, nell'acqua.

L'acqua potabile, secondo una media di stime mondiali, conterrebbe da 5 a 6 particelle di MP per litro, numero che si espande di oltre venti volte se l'acqua è contenuta in bottiglie di plastica. Non sono indenni da questa contaminazione le bevande gassate, tè, aranciate, acque toniche, birra, ecc. Quantità significative di MP/NP sono state rilevate nello zucchero e nel miele.

Quanto esposto, lascia presagire che l'inquinamento terrestre da MP/NP possa essere considerato più elevato, pervasivo e grave di quello marino.

L'enormità della problematica nell'ambiente marino aveva sinora posto in secondo piano l'inquinamento degli ambienti terrestri e, soprattutto, dei suoli agricoli, quella metà nascosta che, in una continua interazione, fornisce la linfa vitale per la sopravvivenza delle *autotrofe* specie vegetali alle quali è, indissolubilmente, legata la vita dell'*eterotrofo* genere umano nonché dell'intero mondo animale.

Le evidenze scientifiche hanno prepotentemente dimostrato quanto differente sia la realtà.

Lo studio pubblicato nel 2020 su «Environmental Research» (Oliveri Conti et al., 2020), condotta da un gruppo di ricercatori dell'Università di Catania, laboratorio di Igiene ambientale e degli alimenti in collaborazione con il Laboratoire de Biochimie et Toxicologie Environnementale di Sousse, Tunisia, riscontrando, per la prima volta, la presenza di NP/MP in frutta e

verdura (mele, pere, lattuga, carote, broccoli e patate) ha rappresentato il vero momento di svolta, l'elemento di deflagrazione che ha definitivamente portato al centro del dibattito scientifico attuale l'interazione tra la metà nascosta, la contaminazione da NP/MP e la salute dell'uomo.

I contorni della problematica sono oggi prepotentemente ampliati e non riguardano più, o solo, gli aspetti generali legati all'inquinamento degli ecosistemi terrestri, all'impatto sulla fertilità dei suoli agricoli e alla produttività delle colture. Le conseguenze della scoperta della "insicurezza" connessa alla contaminazione da MP/NP degli alimenti di origine vegetale, sono dirompenti dal momento che questi alimenti sono alla base dello stile alimentare mediterraneo, quello afferente al ben noto modello denominato "*Dieta mediterranea*" – tutelato dall'Unesco come bene immateriale dell'umanità – lo stesso modello utilizzato come riferimento della Dieta Universale proposta dalla Commissione EAT-Lancet e, soprattutto, alla base di uno stile di vita sano che favorisce la longevità e la sostenibilità.

La scoperta conferma, invece, la pervasività della contaminazione da MP/NP che dai suoli agricoli giunge alle fonti alimentari primarie di origine vegetale e, quindi, all'uomo.

La breve disamina della letteratura scientifica degli ultimi cinque anni conferma e dimostra la capacità delle piante di inglobare le MP/NP presenti nei suoli agricoli.

Nonostante l'evidente presenza della MP in tutto l'ambiente terrestre, il loro assorbimento da parte delle piante coltivate non ha ricevuto la giusta attenzione poiché, per decenni, gli scienziati hanno creduto che queste particelle di plastica fossero, semplicemente, troppo grandi per passare attraverso le barriere fisiche di un tessuto vegetale intatto. Lo studio di un team di ricercatori dell'Accademia Cinese delle Scienze, pubblicato a luglio 2020 su «Nature Sustainability» (Li et al., 2020), ha smentito questo assunto e mostrato, letteralmente, come le MP possono penetrare i tessuti vegetali (fig. 2) e così contaminare le specie vegetali.

Era già noto che particelle di circa 50 nanometri potessero penetrare nelle radici delle piante, ma lo studio ha dimostrato che anche particelle di circa 40 volte più grandi possono penetrare nelle piante attraverso l'apparato radicale.

Il team, utilizzando particelle sferiche di polistirene e polimetilmetacrilato di dimensioni submicrometriche e micrometriche, con un minimo grado di flessibilità meccanica, ha dimostrato come queste siano state in grado di penetrare attraverso il piccolo spazio apoplastico delle cellule delle radici delle piante.

Lo studio ha, altresì, illustrato il meccanismo di assorbimento correlato alla presenza di piccole fessure sulle radici laterali che rappresentano, anch'es-

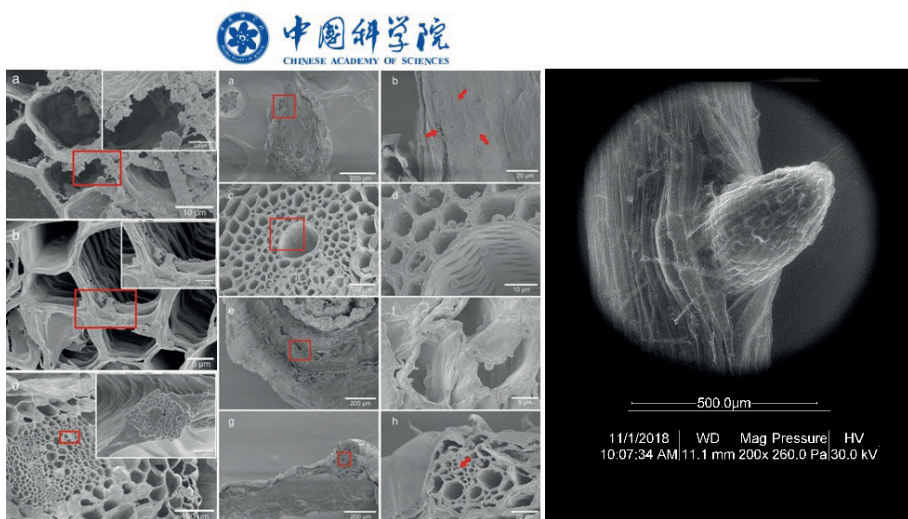


Fig. 2 Immagine dell'interazione MP/radici. Fonte : Li, L. et al. *Effective uptake of submicrometre plastics by crop plants via a crack-entry mode*. Nat Sustain 2020

se, un'ulteriore via di accesso delle MP, e a maggior ragione delle NP, ai vasi dello xilema. È emerso, ancora, che tassi di traspirazione più elevati favoriscono l'assorbimento delle particelle dimostrando così come la traspirazione sia la principale forza trainante del loro movimento.

I risultati dello studio chiariscono le modalità del trasferimento delle MP/NP lungo la catena alimentare. Queste MP e NP sono assorbite dal suolo e dall'acqua circostante la radice, per essere così trasferite alle parti commestibili e giungere nel nostro piatto.

Ahimè, *from farm to fork!*

Questa evidenza è in linea con i risultati del citato studio condotto dall'Università di Catania (Oliveri Conti et al., 2020). Il team di ricercatori non solo ha dimostrato la presenza di MP/NP in frutta e verdura ma anche come le tipologia dimensionale e la concentrazione vari a seconda della matrice. La contaminazione, espressa in particelle per grammo (ppg) di vegetale, ammonta mediamente a 223mila ppg (52.600-307.750) nella frutta e a 97.800 ppg (72.175-130.500) nella verdura. Il livello medio più alto di MP è stato trovato nelle mele e nelle carote, il livello più basso nelle lattughe; le particelle di dimensione media più piccola (1,51 μm) è stata trovata nelle carote, mentre la dimensione media più grande (2,52 μm) è stata individuata nella lattuga.

In generale, tra i campioni oggetto di studio è emersa una maggiore presenza di residui di natura plastica nella frutta piuttosto che nella verdura.

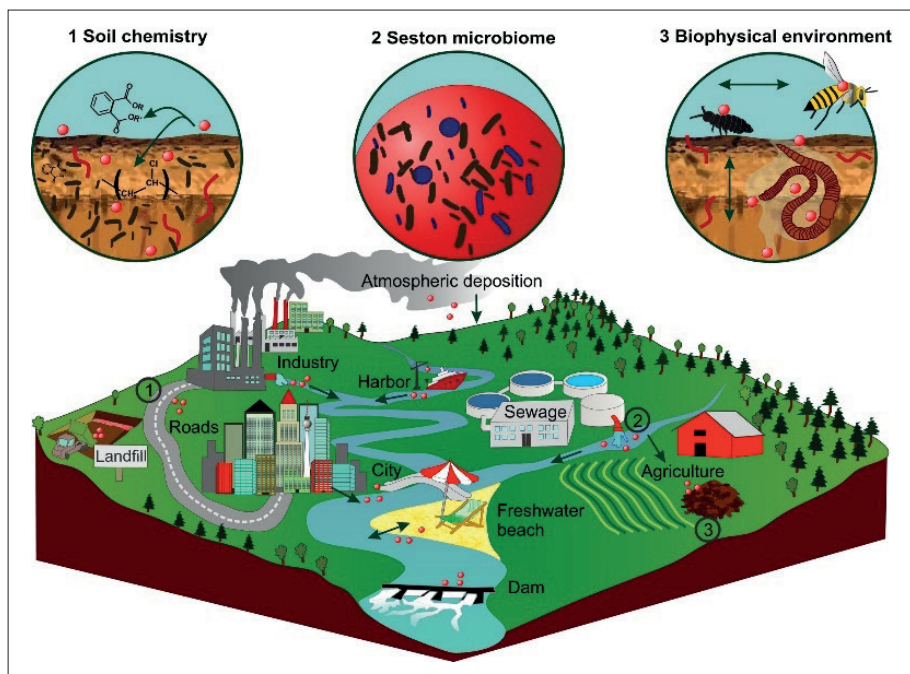


Fig. 3 Fonti di contaminazione terrestre ed interazione MP/NP/soilo. Fonte: A.A.de Souza Machado et al. - Microplastics as an emerging threat to terrestrial ecosystems. «Glob. Chan. Biol.» 2018

La narrata problematica, certamente, impatta pesantemente sulla sicurezza alimentare e sulla salute ma, ancor di più, sulla sostenibilità agricola, che è uno tra gli obiettivi fondanti dell'Agenda 2030 dell'Organizzazione della Nazioni Unite per lo sviluppo sostenibile. Suoli fertili e non contaminati sono un fattore chiave per raggiungere sia gli obiettivi di Agenda 2030 che del New Green Deal europeo.

Il suolo, la metà nascosta, è un ecosistema essenziale che fornisce servizi preziosi, non solo partecipa alla fornitura di cibo, energia e materie prime, ma anche al sequestro del carbonio e, al ciclo dell'acqua, fondamentali per combattere il cambiamento climatico, salvaguardare la biodiversità e gli ecosistemi.

A questo proposito, la precitata *opinion* del 2017 (Abel de Souza Machado et al., 2018) tra le altre cose, metteva in evidenza gli effetti delle deleterie MP sulla chimica, sul microbioma e sull'ambiente biofisico del suolo (fig. 3).

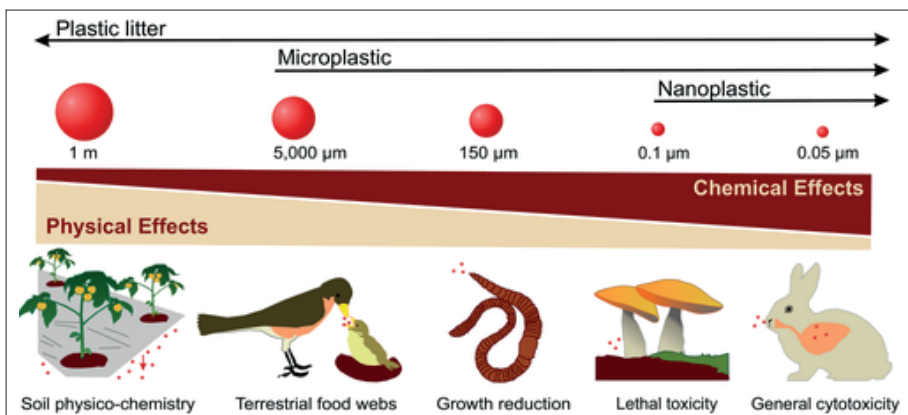


Fig. 4 Interazione tra dimensione della particelle di plastica ed effetto. Fonte: Fonte: A.A.de Souza Machado et al. - *Microplastics as an emerging threat to terrestrial ecosystems*. «Glob. Chan. Biol.» 2018

Metteva altresì in evidenza come con il diminuire delle dimensioni delle materie plastiche si amplificasse l'effetto chimico-tossicologico sull'ecosistema (fig. 4).

Il successivo studio del 2019 (Abel de Souza Machado et al., 2019) ha, così, approfondito l'effetto delle MP sulle proprietà biofisiche del suolo e sulle interazioni suolo-pianta, ivi inclusi gli effetti sulle comunità microbiche del suolo e sui tratti delle piante.

Lo studio ha valutato gli effetti di sei diverse microplastiche (fibre di poliestere, perline di poliammide e quattro tipi di frammenti: polietilene, poliestere tereftalato, polipropilene e polistirene) sul suolo, sui rapporti pianta-suolo e sui tratti vegetali utilizzando come pianta-modello *Allium fistulosum* (il comune cipollotto).

La ricerca ha dimostrato che le MP influenzano i parametri fisici del suolo e la dinamica dell'acqua poiché i cambiamenti nella struttura del terreno e nella sua composizione modificano la porosità. Il conseguente aumento dell'evaporazione riduce l'acqua disponibile, con impatti diretti sulla crescita delle piante, sull'attività microbica e sulla desertificazione.

Le piante, dal canto loro, nel tentare di adattarsi all'ambiente contaminato da MP/NP modificano i loro tratti: dalle caratteristiche delle radici, alla composizione tissutale fogliare nonché alla quantità di biomassa vegetale totale prodotta. L'entità dell'effetto si è dimostrato fortemente correlato alla dimensione, forma e composizione chimica delle MP utilizzate. Le fibre di poliestere e le perle di poliammide hanno innescato impatti più pronunciati sui tratti

e sulla funzione delle piante. I risultati hanno messo in evidenza il rapporto causale tra la pervasiva contaminazione da MP nei suoli e l'alterazione del rapporto pianta-suolo che genera una cascata di eventi che impatta marcatamente sugli agroecosistemi e sulla biodiversità terrestre.

Questo studio è in linea con quello pubblicato nel 2020 su «Science» (Rillig and Lehmann, 2020) che descrive i numerosi danni da MP subiti dai terreni contaminati e focalizza l'attenzione proprio sulla gravità delle modificazioni della struttura dei terreni, nonché sulle possibili alterazioni che un accumulo di MP nei suoli potrebbe generare sulla capacità di questi ultimi, una volta saturi, di sequestrare il carbonio, tema, questo, di grande attualità ed al centro delle attuali e future politiche mondiali.

Lo studio condotto nel 2020 da un team di ricercatori cinesi dell'università di Shandong e dell'Università del Massachusetts – Amherst, pubblicato su «Nature Nanotechnology» (Sun et al., 2020), fornisce le prime prove dirette del diverso meccanismo di accumulo nelle piante delle NP derivate da macroplastiche soggette all'azione degli agenti atmosferici che inducono un cambiamento delle proprietà fisiche e chimiche tali per cui le NP possono acquisire cariche superficiali positive o negative.

Gli autori hanno, pertanto, sintetizzato NP di polistirene con cariche superficiali positive e negative, ed utilizzato l'*Arabidopsis thaliana* come pianta modello. Grazie a un approccio integrato di tipo microscopico, molecolare e genetico, hanno dimostrato che entrambe le tipologie di NP possono accumularsi nelle piante ma che lo fanno con modalità diverse. Le particelle cariche positivamente sono accumulate a livelli relativamente bassi nelle punte delle radici ma inducono un maggiore accumulo di specie reattive dell'ossigeno e inibiscono la crescita e lo sviluppo delle piantine molto più di quelle caricate negativamente. Queste ultime sono state osservate con maggiore frequenza nell'apoplasto e nello xilema.

In generale, le NP hanno ridotto la biomassa totale delle piante modello che sono risultate più piccole e con radici molto più corte rispetto al controllo.

Lo studio condotto dall'università inglese Anglia Ruskin, pubblicato sulla rivista «Environmental Science & Technology» (Boots et al., 2019) mette in evidenza la correlazione tra suoli contaminati da MP/NP e lombrichi. Allo scopo i ricercatori hanno misurato l'impatto di suoli contaminati con MP di polietilene ad alta densità (HDPE) sui lombrichi della specie *Aporrectodea rosea*. È emerso che i lombrichi, dopo aver vissuto 30 giorni in un ambiente con presenza di HDPE, perdevano in media il 3,1% del peso rispetto al gruppo di controllo che, in un terreno non contaminato, vedevano incrementare il loro peso del 5,1%.

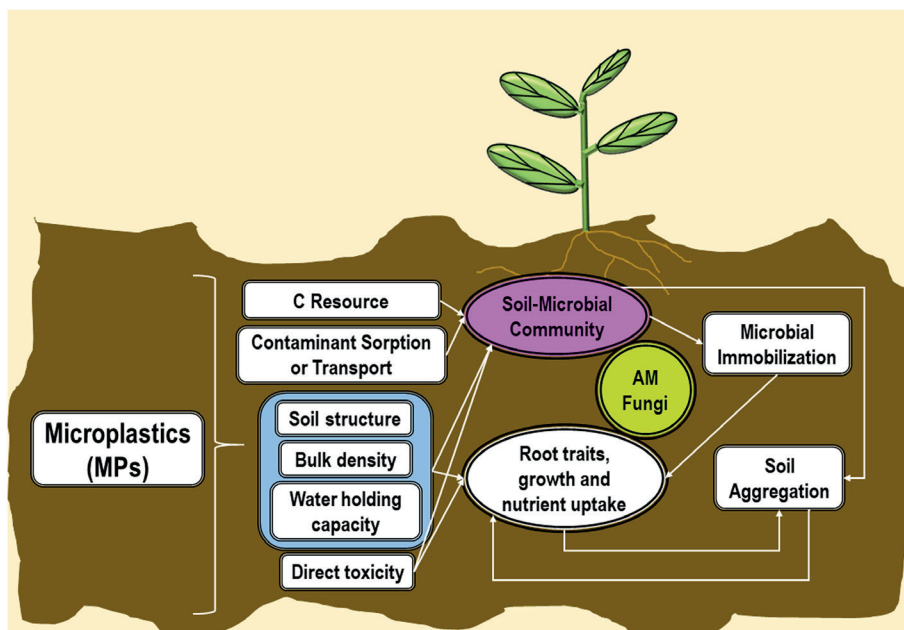


Fig. 5 Interazione tra microplastiche e metà nascosta. Fonte: Saker et al. «A review of microplastics pollution in the soil and terrestrial ecosystems», «Sc. Tot. Env.», 2020

In conclusione possiamo considerare la *metà nascosta* come lo *stargate* delle MP/NP verso la *metà di sopra* e il *mondo vegetale* il vettore di diffusione della contaminazione nell'intera catena alimentare terrestre.

Ma la contaminazione della *metà nascosta* e l'impatto sulla fertilità (fig. 5) hanno anche enormi implicazioni sulla sostenibilità. Per questa ragione l'enormità del problema della contaminazione da MP/NP della *metà nascosta* potrebbe avere un impatto straordinario nel condizionare, negativamente, il raggiungimento di alcuni obiettivi posti dall'ONU attraverso il programma Agenda 2030 volto a garantire lo sviluppo sostenibile globale.

Attraverso i ben noti 17 *Goals* (Obiettivi per lo Sviluppo Sostenibile) riportati nell'infografica (fig. 6), sui quali si fonda Agenda 2030, vengono coniugate le tre dimensioni dello sviluppo sostenibile – economica, sociale ed ecologica – e si punta a porre fine alla povertà, a lottare contro l'ineguaglianza, ad affrontare i cambiamenti climatici, a costruire società pacifiche che rispettino i diritti umani.

Rispetto ai 17 obiettivi, la contaminazione della *metà nascosta* potrebbe condizionare in maniera significativa il raggiungimento di alcuni di questi, come di seguito riportato:



Fig. 6 17 Obiettivi per lo Sviluppo di Agenda 2030

- Goal 2: *Sconfiggere la fame* - Il target da raggiungere prevede di raddoppiare la produttività agricola e il reddito dei produttori di alimenti su piccola scala, garantendo sistemi di produzione alimentare sostenibili e applicando pratiche agricole resilienti che aumentino la produttività e la produzione, che aiutino a conservare gli ecosistemi, che rafforzino la capacità di adattamento ai cambiamenti climatici, alle condizioni meteorologiche estreme, alla siccità, alle inondazioni e agli altri disastri, e che migliorino progressivamente il terreno e la qualità del suolo, nonché salvaguardare la biodiversità.
- Goal 3: *Salute e benessere* - Ridurre il numero di decessi e malattie da sostanze chimiche pericolose e da inquinamento e contaminazione di aria, acqua e suolo.
- Goal 6: *Acqua pulita e servizi igienico-sanitari* - Proteggere e ripristinare gli ecosistemi legati all'acqua, tra cui montagne, foreste, zone umide, fiumi, falde acquifere e laghi.
- Goal 12: *Consumo e produzione responsabili* - Gestione ecocompatibile di sostanze chimiche e di tutti i rifiuti in tutto il loro ciclo di vita e ridurre significativamente il loro rilascio in aria, acqua e suolo, al fine di minimizzare i loro effetti negativi sulla salute umana e l'ambiente
- Goal 14: *Vita sott'acqua* - Prevenire e ridurre in modo significativo l'inquinamento marino di tutti i tipi; gestire e proteggere in modo sostenibile gli

ecosistemi marini e costieri per evitare impatti negativi significativi, anche rafforzando la loro capacità di recupero e agendo per il loro ripristino, al fine di ottenere oceani sani e produttivi.

- Goal 15: *Vita sulla Terra* - Garantire la conservazione, il ripristino e l'uso sostenibile degli ecosistemi di acqua dolce terrestri e nell'entroterra e dei loro servizi, in particolare le foreste, le zone umide, le montagne e le zone aride; combattere la desertificazione, ripristinare i terreni degradati ed il suolo, compresi i terreni colpiti da desertificazione, siccità e inondazioni, e sforzarsi di realizzare un mondo senza degrado del terreno; garantire la conservazione degli ecosistemi montani, compresa la loro biodiversità, al fine di migliorare la loro capacità di fornire prestazioni che sono essenziali per lo sviluppo sostenibile; adottare misure urgenti e significative per ridurre il degrado degli habitat naturali, arrestare la perdita di biodiversità.

Ma c'è di più!

L'enormità del problema della contaminazione della *metà nascosta* impatta fortemente anche con la visione olistica *One Health* che ispira le politiche globali del futuro, basata sull'assunto che esiste una sola salute per gli umani, gli animali e l'ambiente.

Nell'ottica *One Health* la salute della metà nascosta condiziona la salute umana e, pertanto, non possono che creare allarme le evidenze scientifiche che dimostrano la capacità di MP/NP di penetrare i nostri tessuti.

Un team di ricercatori ha esaminato la quantità di MP/NP presenti negli organi e nei tessuti umani ottenendo risultati che, seppur prevedibili non risultano per questo meno preoccupanti (Sarker et al., 2020).

I ricercatori hanno cercato, e trovato, MP e NP in tessuti umani prelevati da cervello, polmoni, milza, fegato, reni, tessuto adiposo.

I pericoli insiti nelle MP/NP sono legati sia alla loro capacità di veicolare sostanze chimiche pericolose, incluse quelle intenzionalmente aggiunte in fase produttiva tra cui ftalati e Bisfenolo A, ma anche contaminanti ambientali che possono venire assorbiti sulla loro superficie durante il loro uso e la permanenza nell'ambiente e, solo per citarne alcuni: stirene, metalli pesanti, policlorobifenili (PCB), idrocarburi policiclici aromatici (IPA).

Queste sostanze chimiche sono classificate tra gli *interferenti endocrini* e/o *distruttori immunologici*. Le prove che le NP riescono a superare la barriera intestinale, fino a penetrare nelle cellule avvalorano le ipotesi di interferenza di queste sostanze con il metabolismo, innescando uno stato cronico di infiammazione, gravi problemi nello sviluppo, infertilità, predisposizione ad alcuni tipi di tumore, reazioni immunitarie anomale che, nel tempo potrebbero portare a patologie autoimmuni e forme cancerogene.

Alla luce delle crescenti evidenze scientifiche nonché dell'acclarata presenza delle MP/NP in frutta ed ortaggi la Commissione europea ha attivato l'Autorità Europea sulla sicurezza Alimentare e avviato azioni per finanziare la ricerca sull'esposizione alle MP/NP e sui loro effetti sulla salute nell'ambito del nuovo programma quadro di ricerca e innovazione ed invitato tutta la comunità scientifica mondiale a lavorare all'unisono affinché vengano colmate le incertezze e proposte idonee soluzioni.

BIBLIOGRAFIA

- ABEL DE SOUZA MACHADO A., KLOAS W., ZARFL C., HEMPEL S., RILLIG M.C. (2018): *Microplastics as an emerging threat to terrestrial ecosystems*, «Global Change Biology», vol. 24, Issue 4, pp. 1405-1416, April.
- ABEL DE SOUZA MACHADO A., LAU C.W., KLOAS W., BERGMANN J., BACHELIER J.B., FALTIN E., BECKER R., GÖRLICH A.S., RILLIG M.C. (2019): *Microplastics can Change Soil Properties and Affect Plant Performance*, «Environmental Science & Technology», vol. 53, 10, pp. 6044-6052.
- BOOTS B., RUSSELL C.W., SENGU GREEN D. (2019): *Effects of Microplastics in Soil Ecosystems: Above and Below Ground*, «Environmental Science & Technology», vol. 53, 19, pp. 11496-11506.
- Group of Chief Scientific Advisors (2019): Environmental and Health Risks of Microplastic Pollution, Directorate-General for Research and Innovation (European Commission) Published: 2019-08-23.
- LI L., LUO Y., LI R., ZHOU Q., PEIJNENBURG W.J.G.M., YIN N., YANG J., TU C. & ZHANG Y. (2020): *Effective uptake of submicrometre plastics by crop plants via a crack-entry mode*, «Nature Sustainability», vol. 3, pp. 929-937.
- OLIVERI CONTI G., FERRANTE M., BANNI M., FAVARA C., NICOLOSI I., CRISTALDI A., FIORE M., ZUCCARELLO P. (2020): *Micro- and nano-plastics in edible fruit and vegetables. The first diet risks assessment for the general population*, «Environmental Research», vol. 187, August.
- PINHEIRO MACHADO REHM R., GRASHEY-JANSEN S., THALHEIMER M. (2018): *Plastica nel terreno, un problema ancora sconosciuto in frutti-viticultura*, «Frutta e vite», n. 6.
- RILLIG M.C. AND LEHMANN A. (2020): *Microplastic in terrestrial ecosystems*, «Science», vol. 368, Issue 6498, pp. 1430-1431, 26 Jun.
- ROLSKY C., KELKAR V. (2020): *Methods for microplastics, nanoplastics and plastic monomer detection and reporting in human tissues*, Virtual Meeting, American Chemical Society, Ottobre.
- SARKER A., DEEPO D.M., NANDI R., RANA J., ISLAM S., RAHMAN S., NABIL HOSSAIN M., SAIFUL ISLAM MD., BAROI A., KIM J.E. (2020): *A review of microplastics pollution in the soil and terrestrial ecosystems: A global and Bangladesh perspective*, «Science of the Total Environment», Volume 733, 1 September 2020, 139296.
- SUN X-D., YUAN X-Z., JIA Y., FENG L-J., ZHU F-P, DONG S-S., LIU J., KONG X., TIAN H., DUAN J-L., DING Z., WANG S-G., XING B. (2020): *Differentially charged nanoplastics demonstrate distinct accumulation in Arabidopsis thaliana*, «Nature Nanotechnology», vol. 15, pp. 755-760.

Considerazioni conclusive

Durante un lunghissimo periodo storico durato secoli, l'attenzione degli studiosi delle piante coltivate, ma anche di tutte le piante in generale, si è concentrata sulla parte epigea, certamente più facile da sottoporre a indagine sperimentale, quasi dimenticando la "metà nascosta", cioè la radice. In particolare negli ultimi anni si assiste a una sorta di inversione nell'atteggiamento dei ricercatori, nei quali è maturata la convinzione che la stessa radice può rappresentare il "collo di bottiglia" di un possibile incremento di crescita di questo naturale "bionte" che è appunto la pianta, con ciascuna delle due parti indispensabile per la vita dell'altra. Per di più, oltre a sapere, da molto tempo, che non ci può essere uno sviluppo adeguato se ci sono problematiche che investono l'apparato radicale, in tempi ravvicinati si è enormemente ampliata la conoscenza del suolo agrario, ovvero di tutto quel mondo "nascosto" che ospita la pianta e che è tutt'altro che inerte.

Attualmente si è in grado di mettere bene a fuoco la problematica dell'architettura radicale, sulla quale abbiamo accumulato, nonostante il tanto tempo trascorso, poche informazioni certe e consolidate. Vanno utilizzati sempre più i nuovi e importanti strumenti di indagine che si basano sull'uso di sensori, attuatori, mappe radicali digitali, satelliti, analisi di immagine, metodi elettrici; ciò si traduce in una maggiore accuratezza di ogni aspetto della produzione, ma anche in un potenziamento dei principali servizi di supporto ecosistemici (genesì del suolo, cicli biogeochimici, creazione di habitat ottimali per l'incremento di microbiota molto diversificati) utili, a un tempo, alla produzione e alla salvaguardia ambientale. Infatti gli apparati radicali rappresentano il produttore primario nella dimensione sotterranea e, quindi, i suoli sono il più grande serbatoio di carbonio terrestre, la maggior parte del quale è carbonio radicale. La deposizione di carbonio è particolarmente importante negli strati

profondi di suolo così da consigliare il miglioramento genetico delle specie coltivate, ma dotate di apparato radicale profondo così da favorire l'incremento di stock di carbonio. Ciò ha implicazioni con la mitigazione degli effetti del cambiamento climatico così come con la protezione dall'erosione.

Al vecchio concetto di benessere delle piante si è aggiunto, molto più di recente, non più di trenta anni fa, il concetto di “salute” del suolo che comprende in particolare le proprietà biologiche, specificamente la struttura del micro- meso- e macro-biota. La pianta viene quindi ritenuta un olo-bionte cioè un organismo formato dal vegetale e dal microbiota. Anche da questo tipo di considerazioni emerge che si debbano realizzare sistemi colturali in grado di favorire l'accumulo di carbonio e la sua protezione nel terreno insieme alla selezione di piante dotate di sistemi radicali che meglio interagiscano con i microorganismi rizosferici.

Nella prospettiva che il suolo contenga sostanze tossiche alle piante – situazione, sfortunatamente, frequente- la sfida passa nelle mani della ricerca. È il caso delle plastiche e in particolare delle micro e nanoplastiche che rappresentano una minaccia emergente per il funzionamento degli ecosistemi non solo acquatici, ma anche terrestri, in particolare i suoli agricoli. La dimostrazione che nanoplastiche, particelle di dimensioni $\leq 100\text{nm}$, possono accumularsi nelle piante, costituisce una prima evidenza che ci sprona a verificare la traslocazione delle stesse, dalle radici alla frutta e ortaggi che così frequentemente vengono usate nella nostra alimentazione.

Infine una considerazione fondamentale per una “parte nascosta” che l'infezione fillosserica, avvenuta a fine secolo XIX, costrinse i coltivatori di vite a cambiare totalmente inserendo un nuovo piede “americano” al posto di quello naturale. Il problema fu brillantemente risolto. Ma da quel tempo ad oggi molte cose sono cambiate. Si stima che l'85% della viticoltura mondiale sia innestata e che 10 varietà di portainnesti rappresentino il 90% di quelli utilizzati. Le “radici” del vigneto italiano impiantato nel 2019 sono rappresentate per circa il 90% da 7 varietà di portainnesti, tutti selezionati tra il 1869 e 1920. La domanda è inevitabile: siamo adeguati per le sfide della viticoltura del prossimo ventennio (cambiamento climatico; sostenibilità del sistema viticolo; garantire competitività alla viticoltura; ecc.)?