

Condizioni biologiche

Le condizioni biologiche del terreno in generale e, specificamente, del terreno agrario si riferiscono ad un universo particolare presente nel suolo il quale è popolato da una enorme varietà di organismi viventi che, da un punto di vista quantitativo, ha ben pochi riscontri in altri settori della biosfera terrestre.

La massa di tutti gli organismi viventi nel terreno è tale che nel terreno, accanto alla fase solida, liquida e gassosa, è possibile distinguerne ancora un'altra che è la *fase vivente* o *biofase*. La fase vivente del terreno è detta anche parte *solida organizzata* poiché è in grado di trasformare gli elementi minerali e le sostanze organiche in materia vivente organizzata.

Tutti gli organismi del mondo biologico sono provvisti di una struttura basilare ed elementare che è la cellula. Sotto questo punto di vista, il terreno può essere un'entità complessiva che possiede tutte le caratteristiche di un organismo vivente. Il terreno, in un certo qual modo, è in grado di respirare, perché fissa l'ossigeno ed emette anidride carbonica, come dimostra la composizione dell'aria tellurica. Il terreno, in senso lato, possiede un proprio metabolismo dato dalla fase anabolica – con la quale avvengono i processi di assimilazione, come la sintesi del carbonio, la fissazione dell'azoto atmosferico – e dalla fase catabolica, attraverso la quale si svolgono tutti i processi di dissimilazione come la degradazione e la mineralizzazione della sostanza organica. Il terreno, infine, è capace di accumulare le sostanze di riserva costituite dall'humus.

Tutto ciò si realizza perché nel terreno esiste un numero infinito di organismi, dalle dimensioni microscopiche a quelle di visibilità ad occhio nudo, che hanno concorso al processo di pedogenesi, che concorrono a stabilire e regolare la fertilità, che conservano ed assicurano per un tempo sufficientemente lungo un adeguato supporto nutritivo alle piante ed alle coltivazioni. Calcoli più o meno approssimati fanno ritenere che la massa degli organismi viventi del terreno sia compresa tra 1.000 e 10.000 kg di cellule per ettaro, corrispondente ad una popolazione di densità variabile tra 50-100 milioni ed un miliardo di organismi, principalmente di microrganismi per grammo di peso secco.

La distruzione di tutta o anche una parte di quest'immenso patrimonio vivente comporta la morte del terreno che diventa un supporto inerte, privo della sua massa vivente. Un simile malaugurato evento, già diventato, purtroppo, una realtà in quei terreni sottoposti ad un grado di intensività colturale straordinariamente alto, che ha costretto ripetutamente a trattamenti pesticidi geosterilizzanti per far fronte alla pressione dei parassiti, causa di malattia delle piante, fa comprendere la grande importanza della massa di organismi. Ed è proprio da questi organismi naturali del suolo che dipende la funzione centrale del terreno negli equilibri ambientali.

Nella fertilità naturale del terreno agrario, gli organismi viventi giocano un ruolo fondamentale e di essi, da un punto di vista pratico, risulta più importante la conoscenza delle attività e delle funzioni che non la loro classificazione. Questo mondo di organismi le cui dimensioni oscillano entro valori di grandissima ampiezza, come poi si vedrà, è in stretta relazione con le piante superiori, spontanee o coltivate, attraverso il loro apparato

radicale. Quella parte di terreno che contiene le radici delle piante prende il nome di *rizosfera* ed è caratterizzata da un habitat microbiologico con limiti poco definiti, con un gradiente microbiologico che va dalla superficie delle stesse radici, dove si realizza una forte interazione tra piante e microrganismi, fino a quella parte del terreno dove tale interazione diventa molto debole o si annulla. Questa variazione di intensità dell'interazione tra pianta ed organismi del terreno ha fatto ritenere che la rizosfera possa essere distinta in tre regioni strutturali e funzionali. Queste sono l'*endorizosfera* o *istosfera*, il *rizopiano* e l'*ectorizosfera*. L'*endorizosfera* o *istosfera* è rappresentata dai tessuti corticali delle radici, normalmente colonizzati dai microrganismi. Il *rizopiano* rappresenta l'interfaccia tra la superficie delle radici ed il terreno e può essere tanto intensamente colonizzato dai microrganismi da dar luogo ad una specie di guaina avvolgente i peli radicali, così che tutte le attività nutritive della pianta sono mediate da questo manicotto microbico. L'*ectorizosfera* è quella parte di terreno che è influenzata dall'attività radicale. Questa si estende da qualche millimetro dalla radice fino a 50 cm ed oltre ed in essa avviene l'intensa proliferazione dei microrganismi. In particolare, l'*endorizosfera* è costituita da microrganismi non patogeni che colonizzano le radici delle piante in un rapporto di simbiosi mutualistica tra pianta e microrganismo. E' questo il caso, ad esempio, dei batteri azotofissatori delle leguminose, oppure di molti microrganismi saprofiti che vivono a spese di tessuti radicali morti in decomposizione. Bisogna ricordare, sinteticamente, che i rapporti reciproci tra gli esseri viventi sono regolati dalla *simbiosi* che può essere *mutualistica* ed *antagonistica*. Si ha la simbiosi mutualistica quando ambedue gli organismi che vivono insieme (*simbionti*) traggono da tale convivenza un reciproco beneficio (il vantaggio può essere anche a favore di uno, senza che l'altro riceva un danno, in tal caso si parla di *commensalismo*). La simbiosi è antagonistica quando uno dei simbionti (*parassita*) trae vantaggio e vive a spese dell'altro che riceve un danno e può soccombere. I *saprofiti* sono organismi che vivono a spese della sostanza organica in decomposizione e contribuiscono anch'essi ai processi di demolizione. Va anche detto che nel terreno, nella realtà, distinzioni così nette non sono molto frequenti, mentre è molto più facile trovare una serie di casi intermedi tra il mutualismo, parassitismo e saprofitismo.

Gli organismi presenti nel terreno, che ne determinano le condizioni biologiche, possono essere di dimensioni microscopiche (con un diametro maggiore inferiori a 0,2 mm) e macroscopiche (superiori a 0,2 mm), possono appartenere al regno vegetale (pedoflora), al regno animale (pedofauna) o a gruppi microbici particolari come i virus, i viroidi ed i micoplasmi e possono trovarsi nel terreno, nelle radici delle piante, su resti vegetali, in tessuti di organismi vettori, adsorbiti sui colloidi organici e minerali.

Molti di tali organismi del terreno rappresentano gli anelli di una precisa catena alimentare, per la quale tutti sono tra loro legati in precisi rapporti trofici. Si conoscono i consumatori primari che vivono a spese delle piante e sono spesso ad esse dannosi come batteri, funghi, attinomiceti, nematodi, acari, insetti. Vi sono poi i saprofiti, la schiera più diffusa e numerosa che vivono a spese dei residui e delle spoglie delle piante e manifestano un'azione molto favorevole sulla struttura del terreno perché lo rimescolano, lo glomerulano, formano gallerie (lombrichi, aracnidi, insetti, piccoli mammiferi) e favoriscono l'azione della microflora utile (batteri, funghi, attinomiceti). Sono noti i consumatori secondari che sono quelli che si nutrono di quelli primari, per cui protozoi, rotiferi, nematodi, acari, collemboli ed altri insetti si nutrono prevalentemente a spese di batteri e funghi, ma anche di anellidi, miriapodi, acari, insetti. Infine, abitano il terreno i consumatori terziari che sono esclusivamente predatori e carnivori, vivono a spese della precedente categoria, anche se alcuni di loro possono prolungare la catena alimentare e nutrirsi dei primari, oltre che dei secondari.

PEDOFLORA ED ENTITÀ SUBMICROSCOPICHE

La microflora del terreno è costituita dai seguenti gruppi principali di microrganismi: batteri ed attinomiceti, funghi, alghe. Altri gruppi microbici sono i virus, i viroidi ed i micoplasmi che spesso svolgono un ruolo patogenetico nei confronti delle piante coltivate e dei microrganismi del suolo.

Lo studio dei microrganismi del terreno può essere effettuato seguendo lo sviluppo di quattro distinte fasi: quella ecologica, sperimentale, agronomica e pedologica. La fase ecologica comprende lo studio della composizione quanti-qualitativa della popolazione microscopica ed ultramicroscopica del suolo. La fase sperimentale include lo studio della fisiologia e della biochimica degli organismi, la loro funzione, il ciclo vitale in natura ed il loro impiego per la formazione di prodotti metabolici utili. La fase agronomica riguarda l'applicazione dei risultati delle attività microbiologiche alla fertilità del terreno ed alla produzione del raccolto. La fase pedologica prende in considerazione l'importanza dei microrganismi per la formazione e la struttura del terreno agrario. Un'indicazione molto generica sulla composizione della microflora del terreno si può ottenere osservando le diverse colonie che si sviluppano dopo aver inseminato una piastra Petri contenente agar-estratto di terra con una sospensione, molto diluita, di 1 g di terreno. L'osservazione porta ad evidenziare una multiforme popolazione costituita da colonie di batteri, attinomiceti, funghi e lieviti. Effettuando il conteggio di ciascuno dei gruppi microbici citati si ottiene lo *spettro microbico*, la cui conoscenza è importante nella valutazione delle biomasse, ma quasi mai permette di riscontrare le correlazioni tra la densità della popolazione microbica e lo svolgimento delle corrispondenti attività nel suolo. L'ambientamento nel terreno di microrganismi estranei, introdotti artificialmente, diventa molto difficile senza aver preventivamente modificato alcuni fattori ambientali. Questa considerazione, che scaturisce da molte inoculazioni artificiali che sono rimaste senza esito, consente di poter affermare che la biofase del terreno tende ad una naturale condizione d'equilibrio, in relazione ad una capacità d'autoregolazione. In relazione a tale stabilità, i microrganismi del terreno sono distinti in gruppi fisiologici, caratterizzati da microrganismi responsabili di una funzione ben precisa, come, per esempio, la fissazione dell'azoto atmosferico, la degradazione della cellulosa, la nitrificazione. In tal modo, l'interesse di ogni specie microbica è legato all'attività che essa è in grado di esplicare.

Batteri

I batteri o *Schizomycetes*, per la tipologia predominante di moltiplicazione, sono il gruppo microbico del terreno che presenta la maggiore densità di popolazione, il cui numero, valutato mediante la tecnica dell'inoculazione di una piastra Petri con una sospensione nota di suolo, è di 10^6 - 10^{10} per grammo di terreno, mentre effettuando la conta diretta al microscopio, i valori che si registrano sono 5-10 volte superiori. I terreni ricchi di humus calcico e quelli coltivati presentano un'elevata carica batterica, spesso non uniformemente distribuita lungo il profilo.

Gli studi sulla composizione quantitativa e qualitativa della popolazione microbica del terreno rappresentano una prima fase delle ricerche sulla conoscenza dei batteri del suolo. Alcuni dei più importanti generi di batteri presenti nel terreno sono riportati nella tabella 45.

Tab. 45 – Ordini, famiglie e generi di batteri più importanti, loro forma, trofismo e principale azione.

Ordine	Famiglia	Genere	Forma e trofismo	Azione
<i>Pseudomonadales</i>	<i>Nitrobacteriaceae</i>	<i>Nitrosomonas</i>	aerobi, autotrofi	ossidano NH_3 a NO_2^-
		<i>Nitrobacter</i>	aerobi, autotrofi	ossidano NO_2^- a NO_3^-
	<i>Thiobacteriaceae</i>	<i>Thiobacillus</i>	aerobi, autotrofi	ossidano S e H_2S a SO_4^{2-}
	<i>Methanomonadaceae</i>	<i>Hydrogenomonas</i>	autotrofi	ossidano H^+ a H_2O
		<i>Carboxydomonas</i>	chemioautotrofi	ossidano CO a CO_2
		<i>Methanomonas</i>	chemioautotrofi	CH_4
	<i>Caulobacteriaceae</i>	<i>Caulobacter</i>	chemioautotrofi	ossidano Fe^{2+} a Fe^{3+}
	<i>Siderocapsaceae</i>	<i>Siderocapsa</i>	chemioautotrofi	ossidano Fe^{2+} a Fe^{3+}
	<i>Pseudomonadaceae</i>	<i>Pseudomonas</i>	eterotrofi	fissatori di N_2
		<i>Xanthomonas</i>	eterotrofi	parassiti e saprofiti
		<i>Azotomonas</i>	eterotrofi	fissatori di N_2
	<i>Spirillaceae</i>	<i>Vibrio</i>	aerobi	cellulolitici
		<i>Cellvibrio</i>	aerobi	cellulolitici
		<i>Cellfalcicula</i>	aerobi	cellulolitici
		<i>Desulfovibrio</i>	anaerobi	riducono SO_4^{2-}
		<i>Spirillum</i>	anaerobi	assimilano N_2
<i>Eubacteriales</i>	<i>Azotobacteriaceae</i>	<i>Azotobacter</i>	aerobi, eterotrofi	assimilano N_2
		<i>Beijerinckia</i>	aerobi, eterotrofi	assimilano N_2
		<i>Derxia</i>	aerobi, eterotrofi	assimilano N_2
	<i>Rhizobiaceae</i>	<i>Rhizobium</i>	eterotrofi	simbionti
		<i>Agrobacterium</i>	eterotrofi	parassiti o saprofiti
		<i>Chromobacterium</i>	eterotrofi	fa parte della rizosfera
	<i>Achromobacteriaceae</i>	<i>Achromobacter</i>	eterotrofi	produzione di NO_2^-
		<i>Flavobacterium</i>	aerobi, eterotrofi	degrada i pesticidi
	<i>Micrococcaceae</i>	<i>Micrococcus</i>	isolati o in colonie	Proteolitici
		<i>Sarcina</i>	sferici	idratano l'urea
	<i>Corynebacteriaceae</i>	<i>Corynebacterium</i>	eterotrofi	produzione di NO_2^-
		<i>Arthrobacter</i>	eterotrofi	fissatori di N_2
		<i>Cellulomonas</i>	aerobi	Cellulolitici
	<i>Bacillaceae</i>	<i>Bacillus</i>	aerobi	Pectinolitici
		<i>Clostridium</i>	anaerobi obbligati	fissatori di N_2
<i>Myxobacterales</i>		<i>Myxococcus</i>		
		<i>Chondrococcus</i>		
		<i>Archangium</i>		
		<i>Sorangium</i>	in zooglee	Cellulolitici
		<i>Polyangium</i>		Cellulolitici
		<i>Cytophaga</i>	aerobi	Cellulolitici
<i>Chlamydobacterales</i>		<i>Sporocytophaga</i>	aerobi	Cellulolitici
			filamentosi	Ferrobatteri
<i>Beggiatoales</i>	<i>Beggiatoaceae</i>		filamentosi	Solfobatteri

Nella figura 41 sono rappresentati, schematicamente alcuni generi di batteri più rappresentativi, di cui alcuni molto utili in agricoltura (ad esempio il genere *Rhizobium*), per l'effetto favorevole che esercitano sulle condizioni di abitabilità e di nutrizione del terreno, mentre altri sono ad azione dannosa per i loro effetti fitopatogeni.

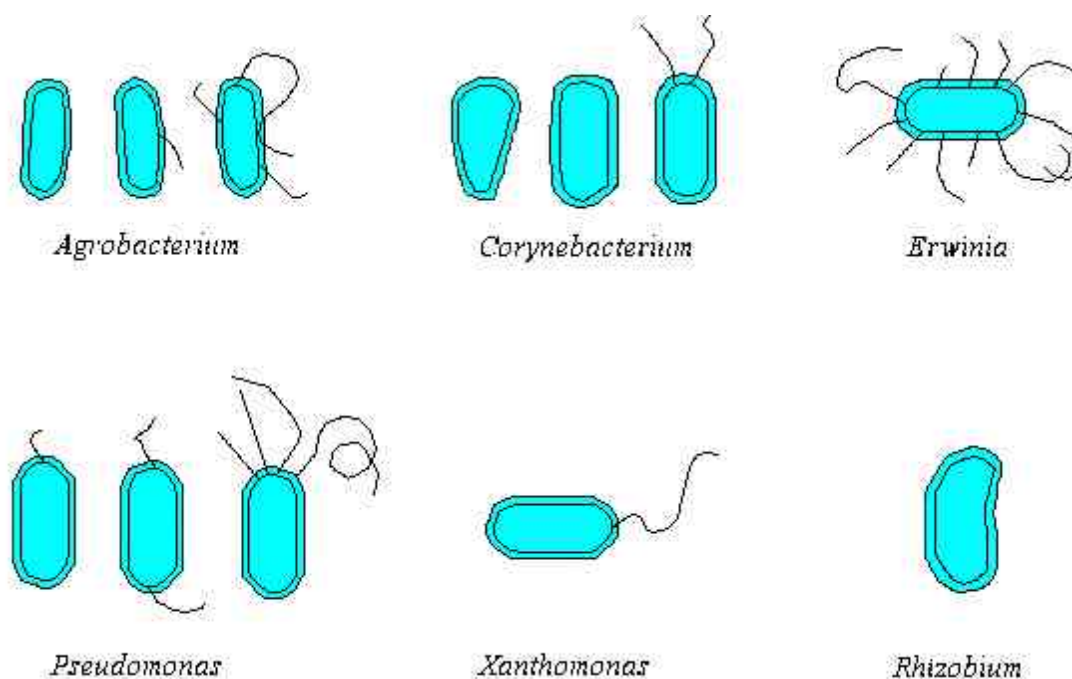


Fig. 41 – Forme schematiche di alcuni generi di batteri viventi nel terreno, alcuni in grado di colonizzare utilmente le radici delle piante, altri capaci di degradare la sostanza organica, altri di esercitare un'attività fitopatogena negativa.

Il genere *Arthrobacter* (figura 42) è quello numericamente predominante, potendo rappresentare il 20-25% della popolazione.

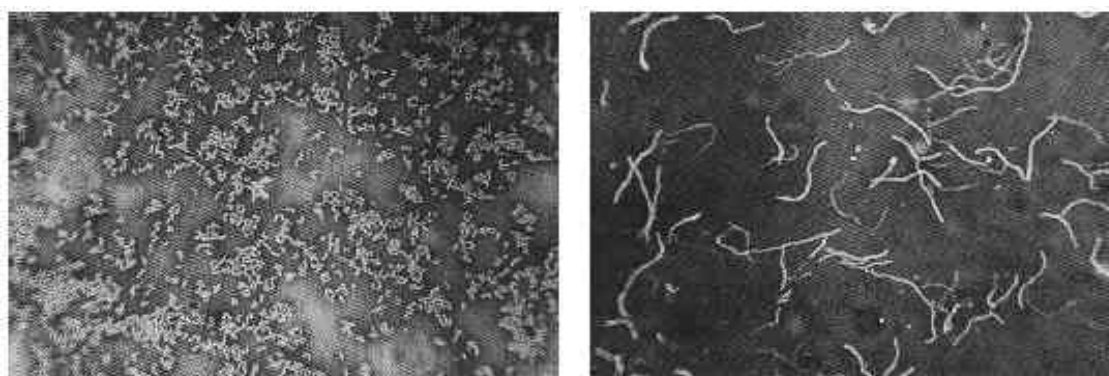


Fig. 42 – Cellule di 2 ore di coltura (a sinistra) e di 30 ore (a destra) evidenziano caratteristiche di polimorfismo in *Arthrobacter globiformis*. Il genere *Arthrobacter* è quello più rappresentato nel terreno (oltre il 40% dell'intera popolazione batterica) ed, in aggiunta ad una variazione morfologica che compare durante il ciclo vitale, presenta anche una Gram variabilità (Paul e Clark, 1989).

Seguono i batteri aerobi sporigeni, come il genere *Bacillus*, poi i generi *Pseudomonas* (figura 43) e *Corynebacterium*. I batteri simbiotici azotofissatori, quelli del ciclo dell'azoto e di altri elementi, anche se quantitativamente sono relativamente poco rappresentati, rivestono un'importanza preminente perché ad essi si devono attività che consentono la vita del terreno, delle piante e di tutti gli esseri viventi.

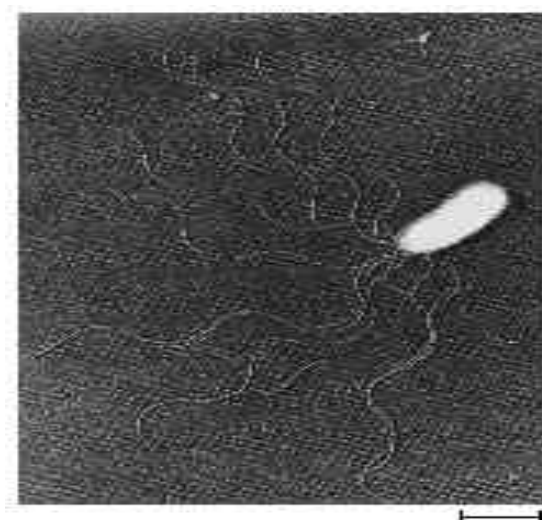


Fig. 43 – *Pseudomonas marginalis*, un batterio assai comune nel suolo che può essere causa di batteriosi parenchimatiche (marciumi molli) in molti ortaggi (da Cuppels e Kelman, 1980).

La densità di popolazione batterica è più elevata nei terreni ricchi di sostanza organica e ben coltivati, rispetto a quelli poveri ed incolti e decresce con l'aumento della profondità. I terreni e gli orizzonti del terreno a reazione tendente all'alcalino sono più ricchi in batteri dei terreni e degli orizzonti acidi.

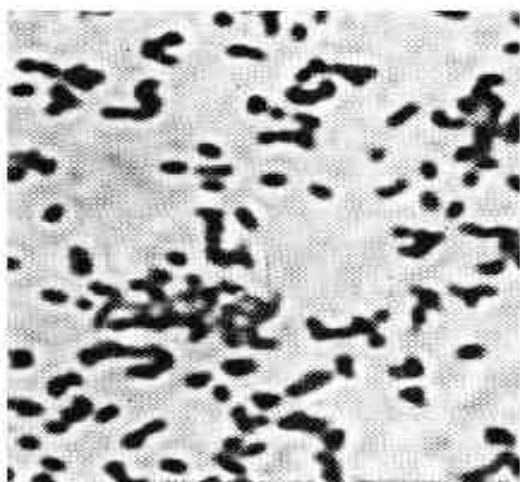


Fig. 44 – Morfologia microscopica di *Rhizobium leguminosarum*, batterio che causa la formazione di tubercoli radicali nelle leguminose (da Florenzano, 1972).

La presenza delle radici delle piante stimola la proliferazione dei batteri e dà luogo a quello che si chiama “effetto rizosfera”. Il *Rhizobium leguminosarum* (figura 44) è un batterio che si sviluppa rigogliosamente nella rizosfera di piante della famiglia delle leguminose ed è in grado di colonizzare le radici sulle quali induce la formazione di tubercoli che rappresentano un esempio di simbiosi mutualistica tra piante e batteri.

Alcuni batteri vivono a spese di altri batteri andando a realizzare una vera azione di parassitizzazione. La specie *Bdellovibrio bacteriovorus* (figura 45) vive nel suolo e nei liquami di fogna, si muove per mezzo di un solo flagello caudale e vive a spese di numerosi batteri fitopatogeni del terreno, potendo, così, indurre una moderazione dei danni che questi ultimi possono causare alle coltivazioni.



Fig. 45 - *Bdellovibrio bacteriovorus*, provvisto di un lungo flagello posteriore, mentre attacca una cellula a bastoncello di *Erwinia amylovora*, il batterio che causa il colpo di fuoco in alcune pomacee. Questo batterio iperparassita potrebbe essere adeguatamente utilizzato in programmi di lotta biologica verso questa pericolosa malattia (Stolp e Starr, 1963).

Una distinzione ecologica, proposta da Winogradsky molti anni orsono e che può considerarsi tuttora valida, differenzia i batteri del terreno in autoctoni e zimogeni. I primi sono quelle forme che manifestano un'attività costante nel tempo e presentano una composizione quantitativa e qualitativa che è scarsamente influenzata dai fattori ambientali, in relazione ad una grande stabilità raggiunta da questa porzione della biofase del terreno. Al contrario, i microrganismi zimogeni includono quelle specie che subiscono nel tempo forti fluttuazioni di popolazione e la cui attività è strettamente connessa alla composizione del substrato ed in modo particolare alla presenza di materia organica. Così, l'afflusso al terreno dei residui vegetali o delle spoglie della pedofauna o di materia organica somministrata con l'attività agricola determina un arricchimento del

terreno in microrganismi zimogeni e tale stimolazione è addirittura elettiva, nel senso che se il materiale organico è ricco in proteine si verificherà la proliferazione di una microflora proteolitica, se è ricco in cellulosa allora prevarranno i microrganismi cellulolitici, se vi è lignina, gli esseri viventi xilolitici risulteranno dominanti. Va anche detto che se le conoscenze su microrganismi zimogeni sono molto dettagliate, ancora poco si sa sulla popolazione microbica autoctona la quale è molto legata all'evoluzione delle sostanze umiche.

I batteri sono normalmente raggruppati in microcolonie. Studiando la microdistribuzione delle colonie in una sezione di aggregato strutturale di terreno ed esaminando quadratini di 70 μ di lato, il 52,7% di tali quadratini non presentava colonie,

il 28,6 % ne ha fatto rilevare 1, il 10,8% 2, il 2,7% 3, lo 0,4% 4, lo 0,1% contiene 5 colonie, il 4,7% corrisponde a vuoti o frammenti di materia organica o zone in cui non è stata possibile l'osservazione. Esaminando le particelle colloidali, si può osservare che i batteri possono essere ad esse adsorbiti, possono concorrere alla formazione di aggregati cementati dai polisaccaridi che producono sotto forma di capsule o di filamenti che si addensano ai frammenti vegetali, possono svilupparsi su substrati diversi fra le micelle ed entro i micropori.

I batteri, per poter vivere e proliferare hanno bisogno di un idoneo substrato nutritivo il quale è necessario per il rifornimento delle materie prime per la sintesi del protoplasma cellulare, è indispensabile quale fonte d'energia necessaria allo sviluppo, è utilizzato come accettore di elettroni che si liberano nelle reazioni producenti energia.

In batteri sono distinti, in rapporto alle modalità di nutrizione, in eterotrofi ed autotrofi a seconda che utilizzano il carbonio e l'energia dei composti organici oppure il carbonio inorganico della CO_2 o dell'anione bicarbonato. I microrganismi autotrofi sono distinti in *fotoautotrofi* e *chemioautotrofi* a seconda che utilizzano l'energia luminosa oppure l'energia prodotta dall'ossidazione di alcuni composti organici. Nei batteri chemioautotrofi (che sono la quasi totalità, poiché dei fotoautotrofi non si hanno sufficienti conoscenze circa la loro presenza nei terreni) si hanno tre tipi di metabolismo: respirazione con ossigeno come accettore finale (aerobiosi), anaerobiosi con un composto minerale come accettore finale, fermentazione in cui l'accettore finale è un composto organico.

Dal punto di vista del comportamento ossido-riduttivo, i batteri del terreno sono *aerobi obbligati* se l'ossigeno è assolutamente necessario alla sopravvivenza, *anaerobi facoltativi* se si sviluppano indifferentemente in presenza o in assenza d'ossigeno e il suolo (substrato di crescita) contiene determinati elementi o sostanze necessari al metabolismo, *microaerofili* se lo sviluppo è più favorevole in ambienti con basse concentrazioni d'ossigeno, *anaerobi obbligati* se sono inibiti nella crescita o uccisi dalla presenza di quantità, anche minime, d'ossigeno, in relazione al fatto che tale gas causa l'inattivazione dei trasportatori d'elettroni, porta alla formazione di H_2O_2 ed altri composti tossici.

La conoscenza dei concetti ora esposti è di fondamentale importanza in quanto le caratteristiche di abitabilità di un terreno influiscono pesantemente sulle caratteristiche biologiche e sono in grado di agire su un processo di selezione dei microrganismi e, quindi, determinare le condizioni di fertilità e di produttività agronomica del suolo.

I batteri chemioautotrofi, che consentono lo svolgersi di cicli biogeochimici dei principali elementi nutritivi ed esercitano numerosi effetti sull'equilibrio biochimico del terreno, normalmente ossidano il composto inorganico per utilizzare l'energia che si libera dal processo d'ossidazione. Così, per esempio, essi ossidano i composti dell'azoto

(batteri nitrificanti) come l'ammoniaca a nitrito (*Nitrosomonas*) e quest'ultimo a nitrato (*Nitrobacter*); i composti ridotti dello zolfo sono ossidati a solfati (*Thiobacillus*); i composti ferrosi sono ossidati a composti ferrici (*Ferrobacillus*, *Gallionella*), l'ossido di carbonio è ossidato ad anidride carbonica (*Carboxydomonas*).

I batteri eterotrofi generalmente non manifestano esigenze molto specifiche potendo essi utilizzare un gran numero di composti come monosaccaridi, disaccaridi, polisaccaridi, acidi organici, alcoli mono e polivalenti, ossiacidi. Tuttavia, alcuni composti come la cellulosa sono utilizzati da un numero ristretto di specie. Spesso i batteri eterotrofi perdono la capacità di produrre uno o più composti organici essenziali per il loro metabolismo (aminoacidi utilizzati nella sintesi delle proteine, purine e pirimidine necessarie per la sintesi degli acidi nucleici, complessi enzimatici e vitaminici). In tal caso, affinché la crescita possa normalmente avvenire, è gioco forza trovare tali prodotti trofici nel mezzo nel quale si sviluppano.

I batteri sono classicamente distinti in *Gram-positivi* e *Gram-negativi*, secondo la loro reazione alla colorazione di Gram. La metodica di Gram è un sistema empirico in cui le cellule sono trattate prima con il colorante cristalvioletto e con iodio e poi decolorate e trattate con la safranina.

Fra i tanti criteri di classificazione dei batteri del suolo, quello del raggruppamento fisiologico fondato sull'individuazione delle esigenze nutritive sembra essere molto confacente allo studio delle caratteristiche microbiologiche di un terreno. Ciascun gruppo nutrizionale, detto anche gruppo fisiologico o gruppo ecologico, è tassonomicamente molto ampio, potendo includere specie, famiglie ed ordini differenti, i cui membri si sono adattati a condizioni fisiologiche e nutritive molto diverse. Il gruppo fisiologico non può scomparire mai dal terreno o dalla rizosfera e le singole specie sono indicatori molto sensibili del substrato. Grande è la complessità e la variabilità per le esigenze nutritive dei batteri del terreno. In generale, soltanto il 10% circa possiede esigenze nutritive molto semplici, come le colonie che si sviluppano su un mezzo minerale. I gruppi fisiologici sono costituiti da un insieme di batteri cui possono associarsi anche altri microrganismi, come gli attinomiceti ed i funghi, appartenenti a gruppi sistematici differenti ma aventi la capacità di svilupparsi in un ben determinato ambiente, perché danno luogo al medesimo processo biochimico. Substrati di coltura selettivi consentono di mettere in evidenza quei raggruppamenti di microrganismi che intervengono in un determinato ciclo biogeochimico.

Nel ciclo dell'azoto, ad esempio, intervengono batteri associati o meno ad altri microrganismi fissatori, proteolitici, ammonizzanti, denitrificanti. Nel ciclo del carbonio un'azione preminente è svolta dai microrganismi amilolitici, pectolitici, emicellulolitici, cellulolitici. Nel ciclo dello zolfo gli specifici microrganismi sono i riduttori dei solfati, i solfo-ossidanti, i mineralizzatori dello zolfo organico. Nel ciclo del ferro si hanno i microrganismi dei complessi organo-ferrici ed i ferro-ossidanti.

Infine, bisogna ricordare i *micoplasmi*, un gruppo specifico di batteri, ed in particolare, in quanto parassiti delle piante, un gruppo di microrganismi simili ai micoplasmi, indicati con l'acronimo MLO (*mycoplasma-like organisms*), che può trovarsi nei tessuti ancora integri dei residui di coltivazioni di piante ammalate. Sono microrganismi che presentano le più piccole cellule conosciute, privi di nucleo (come tutti i procarioti) e senza parete cellulare da cui l'appartenenza ad una classe a sé stante, quella dei *Mollicutes*, dal latino *mollis cutis*. Essi sono normalmente patogeni per le piante coltivate, confinati nei tubi cribrosi del floema e si ritiene che si muovano passivamente da un elemento cribroso all'altro, attraverso i pori delle placche cribrose, seguendo il flusso della linfa elaborata.

Actinomiceti

Gli actinomiceti sono microrganismi unicellulari, filamentosi e ramificati monopodicamente (molto di rado dicotomicamente), che producono colonie a struttura radiata e possono subire frammentazione oppure originare conidi, molto diffusi in natura, di posizione sistematica piuttosto incerta, appartenenti, secondo alcuni, ad un gruppo intermedio tra gli schizomiceti (batteri) e gli eumiceti (funghi). L'ordine d'appartenenza è quello degli *Actinomycetales*, con numerose famiglie tassonomiche facenti parte a questo raggruppamento. Soltanto la famiglia *Actinomycetaceae* ha importanza nel campo della microbiologia pedologica, con i generi, quasi tutti aerobi o microaerofili, *Actinomyces*, *Streptomyces*, *Nocardia* e *Micromonospora*. In particolare, soprattutto i primi due generi comprendono specie saprofite molto diffuse nel terreno, nell'acqua e nell'aria (figura 46).

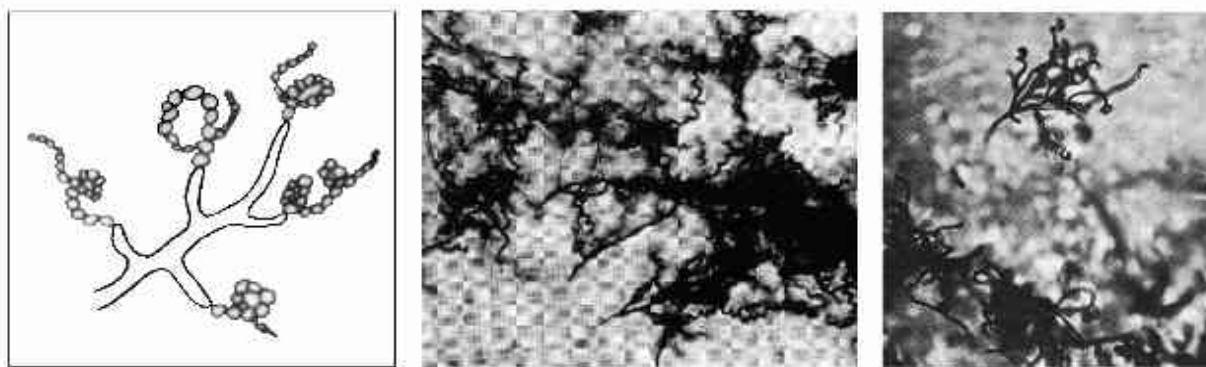


Fig. 46 – Rappresentazione schematica della morfologia del genere *Streptomyces* (a sinistra); al centro, *Streptomyces viridochromogenes*, con la caratteristica vegetazione e le microife sporofore a spirale compatta (da Florenzano, 1977); a destra, *Streptomyces fradiae*, abbondante nel suolo umido, rappresenta un'importante sorgente commerciale di antibiotici (da Lechevalier, 1975).

All'esame microscopico gli actinomiceti si presentano come filamenti cilindrici, incolore, trasparenti, molto sottili (da 0,3 a 1,2 μ di diametro), unicellulari o irregolarmente settati, con membrana indistinta e scarsa differenziazione del contenuto plasmatico. La temperatura ottimale per il loro sviluppo è di 25-35 °C, ma nel terreno si trovano specie capaci di svilupparsi al di sotto di 6 °C ed altre che crescono a 60-62 °C (nei terreni di bosco e di giardino). La reazione favorevole è quella leggermente alcalina, anche se alcune specie sono state isolate in terreni torbosi acidi, con un pH intorno a 4-5 (*Actinomyces acidophilus*).

Gli actinomiceti sono largamente diffusi in tutti i terreni dove il loro numero è inferiore soltanto a quello dei batteri. Nel suolo sono state messe in evidenza più di 100 specie, la cui caratterizzazione è spesso incerta e confusa e la cui importanza nella decomposizione dei costituenti organici del terreno agrario è indubbia, anche se poco o niente è stato accertato sulla particolare attività delle singole specie. Gli actinomiceti sono assai abbondanti negli strati superficiali ove ogni grammo di terreno ne può contenere da poche centinaia a 20-30 milioni. Sono stati trovati fino a 2 m di profondità ed è proprio negli orizzonti inferiori che gli actinomiceti risultano numericamente superiori a qualunque altro gruppo microbico.

I terreni ricchi e ben provvisti di sostanza organica sono quelli che presentano le più elevate concentrazioni di questi microrganismi. La pratica della letamazione, del sovescio ed ogni altra aggiunta di materia organica al terreno ne incrementa la densità di popolazione e ne esalta l'attività.

Gli actinomiceti partecipano, con altri microrganismi, alla degradazione della cellulosa ed emicellulosa, dell'amido e di altri glucidi, specialmente nei terreni neutri o leggermente alcalini e con scarsa umidità. Contribuiscono altresì alla demolizione delle sostanze proteiche da cui si ottengono prodotti che solo in piccola parte vengono assimilati e che sono per lo più rappresentati da ammoniaca.

Gli actinomiceti sono tra i molti microbi che partecipano alla produzione di *humus* e tra i non molti che sono anche capaci di attaccare i resistenti composti umici, procedendo alla loro mineralizzazione e determinando la liberazione di elementi assimilabili dalle piante.

Anche la chitina (di cui è costituito il micelio fungino e l'esoscheletro di molte specie della fauna pedologica, particolarmente artropodi), gli idrocarburi paraffinici ed aromatici, i composti azotati eterociclici, che spesso volte non sono biodegradabili dai batteri e dai funghi, sono attaccati e demoliti dagli actinomiceti.

Alcuni actinomiceti sono in grado di partecipare al ciclo di certi macroelementi e microelementi utili alle piante. I generi *Nocardia* e *Streptomyces*, ad esempio, sono in grado di partecipare ai processi di ossido-riduzione del manganese del terreno.

Altri actinomiceti sono capaci di operare un'attiva degradazione dei pesticidi giunti nel terreno. Il genere *Nocardia* e la specie *Streptomyces aureofaciens* sono in grado di trasformare il principio attivo di alcuni erbicidi, mentre *Nocardia opaca* detossifica, specificamente, i principi attivi 4-(2,4-DB) e MCPB.

L'impiego pratico in agricoltura degli actinomiceti è stato realizzato attraverso numerose prove condotte da diversi ricercatori.

In particolare, il genere *Streptomyces* è stato utilizzato per colonizzare i semi di alcune specie coltivate (soia, barbabietola da zucchero, cipolla, pisello proteico) poi regolarmente seminati.

La colonizzazione dei semi è stata realizzata con differenti ceppi di streptomiceti isolati da radici di piante in ottime condizioni vegetative e selezionati *in vitro* per la loro capacità di esplicare attività benefica sulla crescita vegetale.

Le piante ottenute in campo hanno evidenziato una regolare colonizzazione delle radici. E' stata misurata l'attività PGPR (*Plant Growth Promoting Rhizobacteria*) che è stata costantemente più elevata rispetto alle piante non batterizzate.

Gli effetti degli actinomiceti sulle piante trattate possono essere così sintetizzati: accentuazione della resistenza a fattori abiotici avversi (siccità, freddo); incremento delle disponibilità alimentari; difesa dalle infezioni causate dagli organismi fitopatogeni. Il risultato complessivo ottenuto a seguito dell'impiego della maggior parte dei ceppi di *Streptomyces* è stato un generale incremento della resa e della qualità produttiva delle colture.

L'aumento della produttività delle piante trattate rispetto alle piante testimoni, non trattate, si è espresso con valori compresi tra il 4 ed il 30%.

In definitiva, gli actinomiceti svolgono un'azione complementare degli altri microrganismi del suolo ed espletano un'attiva partecipazione nella decomposizione di alcuni componenti dei tessuti animali e vegetali, i quali altrimenti sarebbero rimasti indecomposti, perché resistenti ai normali attacchi microbici.

Ciò è dimostrato dal fatto che gli actinomiceti non rispondono immediatamente

all'aggiunta dei residui vegetali o di altra materia organica, ma soltanto dopo un certo tempo, perché essi hanno la prevalenza solo quando i prodotti facilmente degradabili sono stati utilizzati da parte di altri microrganismi.

Gli actinomiceti trasformano i residui organici in composti umici caratteristici della frazione organica del suolo e, pertanto, giocano sempre un ruolo attivo nel processo d'umificazione.

Probabilmente gli actinomiceti sono anche dei regolatori dello sviluppo microbiologico del terreno. Sono in grado di produrre probiotici, come il gruppo vitaminico B e sono degli equilibratori dei rapporti quantitativi delle diverse specie di microrganismi, avendo la proprietà di produrre antibiotici.

Tra le tante sostanze che gli actinomiceti metabolizzano v'è anche quella che provoca l'odore di terra bagnata, dovuto, appunto, ad uno specifico composto chiamato geosmina.

Funghi

I funghi sono organismi nucleati, privi di clorofilla, formanti spore, che si riproducono sessualmente ed asessualmente ed i cui filamenti, strutture somatiche ramificate, sono tipicamente circondati da pareti cellulari contenenti cellulosa o chitina o entrambe queste sostanze.

I talli fungini (il tallo è il corpo di una tallofita, cioè di vegetali non distinti in strutture differenziate come la radice, il fusto e le foglie) sono formati da filamenti microscopici, ognuno chiamato *ifa*, che si ramificano in tutte le direzioni.

L'ifa possiede una sottile parete che circonda il protoplasma il quale può essere continuo o interrotto da pareti di sbarramento, dette *setti*. L'insieme delle ife costituisce il *micelio* che può essere non settato (micelio *cenocitico*, tipico della divisione *Zygomycota*) oppure settato, cioè provvisto di setti (divisioni *Ascomycota* e *Basidiomycota* e dei *Fungi imperfecti* o *Deuteromycetes*).

Il micelio, durante il ciclo biologico dei funghi, può originare formazioni particolari, costituite da ife organizzate in strutture più o meno compatte, dette *plectenchimi*, le quali si distinguono in *prosoplectenchimi* o *prosenchimi* (strutture piuttosto lasse in cui è ancora riconoscibile l'individualità delle ife che le costituiscono) e *paraplectenchima* o *pseudoparenchima* (compatto ammasso di ife che hanno perduto la loro individualità).

Queste strutture vanno a costituire vari tipi di organi fungini di cui si ricorda: lo *stroma*, che è uno stretto intreccio di ife che può originare micelio normale o dar luogo a cavità contenenti le fruttificazioni del fungo; lo *sclerozio* che è un corpo nerastro, di varia forma, molto duro, adatto a resistere alle condizioni più sfavorevoli, formato da una corteccia esterna e da un midollo interno; lo *pseudosclerozio* che è un disordinato ammasso di cellule a parete ispessita che non mostra la distinzione tra corteccia e midollo; la *rizomorfa* che strutturalmente è identica allo sclerozio, ma dal quale si distingue per la forma ramificata e per la capacità di crescita apicale.

La moltiplicazione dei funghi avviene per via sessuata ed asessuata, vale a dire con o senza il verificarsi del processo di cariogamia (unione di due nuclei). Nei funghi meno evoluti tutto il tallo si trasforma in organo riproduttivo, così che la fase vegetativa e riproduttiva non coesistono nello stesso individuo (funghi *olocarpici*). Negli altri funghi gli organi riproduttivi prendono origine da una porzione del tallo, mentre le parti

rimanenti continuano la normale attività vegetativa (funghi *eucarpici*).

Nei funghi, la moltiplicazione asessuata o agamica e quella sessuata o gamica si alternano durante il ciclo biologico (*metagenesi*). La prima avviene in molte generazioni successive, durante la buona stagione ed ha il compito di diffondere la specie attraverso la notevolissima massa d'inoculo prodotta, mentre la seconda si realizza una sola volta, durante il periodo invernale sfavorevole ed ha il compito di conservazione della specie. La fase gamica non è nota oppure è mancante nel raggruppamento dei *Fungi imperfecti*.

La moltiplicazione agamica avviene per frammentazione delle ife, per divisione cellulare, per gemmazione, per produzione di *conidi*. Il conidio è l'unità di moltiplicazione agamica.

I conidi sono portati all'esterno di una ramificazione (*conidioforo*) oppure all'interno di un involucro sacciforme (*sporangio* o *conidiangio*) posto su uno *sporangioforo* più o meno ramificato (tipico di molte famiglie della divisione *Zygomycota*).

All'interno dello sporangio i conidi possono essere immobili (*aplanconidi*) oppure mobili e provvisti di uno o due flagelli (*planoconidi* o *zoospore*). I conidi, a volte chiamati impropriamente *spore* (che sono, invece, le unità di riproduzione sessuata), si chiamano *artrospore* se derivano dalla disarticolazione successiva di elementi del micelio, *clamidospore* se derivano da un semplice ingrossamento ed ispessimento di un'ifa terminale o intercalare, *blastospore* se derivano da un processo di gemmazione, *fialospore* se hanno origine endogena (*endoconidi*) ed il conidioforo ha la forma di una fiala (*fialide*).

La riproduzione sessuale consiste nell'unione dei nuclei delle cellule sessuali, dette *isogameti* se uguali (contenute negli *isogametangi*) ed *eterogameti* se differenti (contenute nel gametangio maschile o *anteridio* e nel gametangio femminile od *oogonio*, rispettivamente).

L'unione dei due gameti (maschile e femminile) o *gamia* può avvenire per *copulazione planogametica* (quando i due gameti che si fondono, o uno solo, sono mobili), per *contatto dei gametangi* (quando il gametangio maschile, venuto a contatto con quello femminile, vi fa passare i suoi gameti), per *formazione di spermazi* (se le strutture maschili raggiungono, ad esempio per mezzo dell'acqua, quelle femminili, in forma di ife recettive e vi versano il loro contenuto), per *somatogamia* (se non si produce alcun organo sessuale, poiché la funzione riproduttiva è assolta da qualsiasi parte del tallo).

Da un punto di vista della compatibilità sessuale, i funghi sono *omotallici*, quando il tallo è autofertile e può riprodursi senza l'intervento di un tallo di segno opposto, ed *eterotallici*, quelli con tallo autosterile per i quali la gamia è condizionata dall'incontro con talli di segno opposto.

Le spore dei funghi sono portate da strutture gamiche sulle quali si basa il criterio di classificazione dei funghi: l'*asco*, involucro sacciforme nel cui interno sono contenute le *ascospore*, tipico della divisione *Ascomycota*; il *basidio*, struttura allungata e portante all'esterno le *basidiospore*, impiantate su appendici o punte dette *sterigmi*, tipico della divisione *Basidiomycota*.

Queste strutture gamiche sono libere oppure portate da corpi fruttiferi come: il *peritecio*, concettacolo costituito di una spessa parete paraplectenchimatica, provvisto di un ostiolo e nel cui interno vi sono, oltre gli aschi, le *parafisi* (ife sterili impiantate sulla parete interna e libere all'altra estremità) e le *perifisi* (corte setole disposte presso l'ostiolo, atte a favorire l'uscita delle spore e ad impedire l'entrata di elementi estranei);

lo *pseudotecio*, simile al precedente, spesse volte provvisto di più cavità, privo di parafisi e perfisi, ma provvisto di *pseudoparafisi*, cioè ife sterili fissate alla parete interna con entrambe le estremità; l'*apotecio*, a forma di coppa, stipitato o sessile, con l'insieme degli aschi e parafisi disposti sulla superficie di tale coppa, costituita dall'*imenioascoforo*; il *cleistotecio*, di forma sferica, chiuso quando immaturo, con uno o più aschi all'interno, deiscende alla maturità, spesso con appendici semplici o ramificate (dette *fulcri*) impiantate sulla superficie esterna.

I conidi dei funghi, elementi di moltiplicazione agamica, sono portati da rami conidiofori liberi e superficiali (Deuteromiceti, *Hyphales*).

I conidiofori sono riuniti in fascio a formare una struttura (il *sinnema* o *coremio*) nerastra allungata e sfrangiata alla sommità, dove si trova a maturità una massa di conidi, oppure sono riuniti in ammassi pulviniformi a costituire un cuscinetto (lo *sporodochio*), formato da conidiofori e conidi raggruppati su un basamento stromatico; all'ordine *Hyphales* appartengono le famiglie con conidiofori e conidi non addensati quali le *Dematiaceae* (conidi scuri) e le *Mucedinaceae* (conidi chiari) e le famiglie con conidiofori e conidi addensati quali le *Stilbaceae* (caratterizzate dalla presenza del sinnema o coremio) e le *Tuberculariaceae* (con sporodochio), famiglie che comprendono generi e specie diffusi ampiamente nel terreno.

In altri casi i conidi ed i conidiofori sono contenuti nella cavità di una fruttificazione, il *picnidio* (tipico dei Deuteromiceti *Sphaeropsidales*), di forma globosa, dotato di una spessa parete paraplectenchimatica, provvista di un ostiolo, dal quale escono i conidi alla maturità, o sprovvista dell'ostiolo (in tal caso i conidi fuoriescono alla deiscenza dell'organo), oppure sono portati da una fruttificazione, l'*acervulo* (tipico dei Deuteromiceti *Melanconiales*), costituito da una base stromatica sulla cui superficie s'impiantano conidiofori e conidi.

Lo studio dei funghi è di notevole importanza per le conoscenze delle loro attività e delle loro influenze sul terreno dove si possono osservare specie alloctone, presenti accidentalmente, incapaci di svilupparsi a spese della materia organica del suolo e specie autoctone o indigene in grado di mantenersi sempre in attività nel suolo, capaci di svilupparsi e colonizzare a spese di elementi organizzati, morti ed in via di decomposizione, senza che sia necessaria una fase di parassitizzazione o l'associazione obbligata con un organismo vivente.

Alcuni funghi, come il genere *Chaetomium* e le specie *Cladosporium herbarum* e *Rhizopus arrhizus*, presentano una notevole attività, tipicamente zimogena, poiché sono in grado di decomporre residui vegetali, in particolare dopo la lavorazione del terreno e dopo la caduta di piogge estive.

Da un punto di vista biologico l'ifa fungina svolge una parte importante nel metabolismo dei vari substrati pedologici. Per questo motivo, il numero di specie fungine diventa un valore di importanza relativa perché esso dipende dalla presenza di specifiche spore, conidi e frammenti di micelio, mentre suscitano maggiore interesse la predominanza di colonie della stessa specie e la corrispondente quantità di micelio, tanto che è possibile trovare in un campione di 1 g di terreno un enorme sviluppo di ife.

Nel suolo è possibile rilevare una certa varietà di organismi fungini che esplicano differenti attività.

Molte specie si comportano da saprofiti perché vivono sulle sostanze organiche, contribuiscono alla loro decomposizione e determinano una progressione nella composizione e nelle caratteristiche dei composti umici che originano dai processi di biodegradazione.

In linea generale, la colonizzazione è iniziata dalle specie a rapida crescita le quali utilizzano i composti organici semplici.

In particolare, specie fungine come *Epicoccum nigrum*, *Stachybotrys atra*, *S. chartarum*, *Aspergillus sydowi*, *Hendersonula toruloidea*, insieme ad alcuni batteri ed actinomiceti sono capaci di sintetizzare polimeri di tipo aromatico attraverso il metabolismo secondario, per cui molecole di tipo aromatico possono essere sintetizzate utilizzando carboidrati come substrati organici, attraverso la via metabolica dell'acetato-malonato e dell'acido scichimico: con la prima via metabolica, partendo dal glucosio, attraverso la glicolisi, si ottiene acido piruvico, con prodotti finali rappresentati dall'acido 6-metilsalicilico e dall'acido orsellinico; con la seconda via metabolica, sempre partendo dal glucosio, si genera acido scichimico, acido gallico ed acido protocatechico. Tali prodotti ottenuti rappresentano quelli di partenza per la genesi di altri (pirogallolo, orcinolo, resorcinolo, naftochinoni, l'acido p-idrossicinnamico, l'acido triidrossibenzoico, ed altri) che si ottengono a seguito di reazioni di idrossilazione, demetilazione, decarbossilazione, ossidazione di gruppi metossilici e carbossilici, dei fenoli e dei chinoni, di eliminazione di catene laterali.

Le molecole così prodotte sono accumulate nelle cellule fungine e poi rilasciate nell'ambiente esterno.

Per intervento delle fenolossidasi o di catalizzatori inorganici, l'ossidazione dei fenoli determina successivamente una generalizzata formazione di composti chinonici e la presenza di radicali liberi. Tali molecole, reagendo tra loro o con composti caratterizzati dalla presenza di gruppi NH_2 (ad esempio, aminoacidi) e SH, conducono alla formazione di polimeri che hanno una composizione elementare ed altre caratteristiche chimiche simili a quelle delle molecole umiche.

Negli strati più superficiali di terreno, dove si trovano i residui vegetali recenti, si riscontra un'intensa attività di alcuni ascomiceti, mentre negli strati sottostanti la microflora si arricchisce di altre specie, fra le quali si annoverano diversi funghi imperfetti.

Diversi basidiomiceti, in una zona di terreno relativamente profonda, svolgono un'intensa attività di decomposizione della cellulosa e della lignina.

La decomposizione microbica della cellulosa porta alla formazione di monosaccaridi (glucosio), con formazione di prodotti intermedi simili alle destrine e viene coadiuvata da funghi cellulolitici, come i generi *Simpodiella*, *Helicoma*, *Desmatierella*, *Penicillium* e *Trichoderma*.

Questi sono i primi organismi, a crescita molto rapida, che s'insediano sui residui della vegetazione o delle coltivazioni, cui seguono i generi *Chaetomium*, *Stachybotrys*, *Botrytis*, *Phoma*, *Poria* ed altri.

La decomposizione microbica della lignina richiama i processi di marciume del legno e comporta la liberazione di composti come la vanillina e gli alcoli coniferilico, sinapilico e p-cumarilico.

Questi prodotti sono attaccati attraverso l'innesco di reazioni concorrenti alla produzione di composti di gruppi funzionali (dotati di un'elevata reattività chimica) e si modificano fino alla formazione delle sostanze umiche.

Prima di citare altri generi e specie di funghi del terreno e la corrispondente attività, si ritiene opportuno inserire la figura 47.

Nella figura, utile per il riconoscimento, sono schematicamente riportati alcuni generi dei principali funghi macro e microscopici che vivono nel terreno o sui detriti organici.

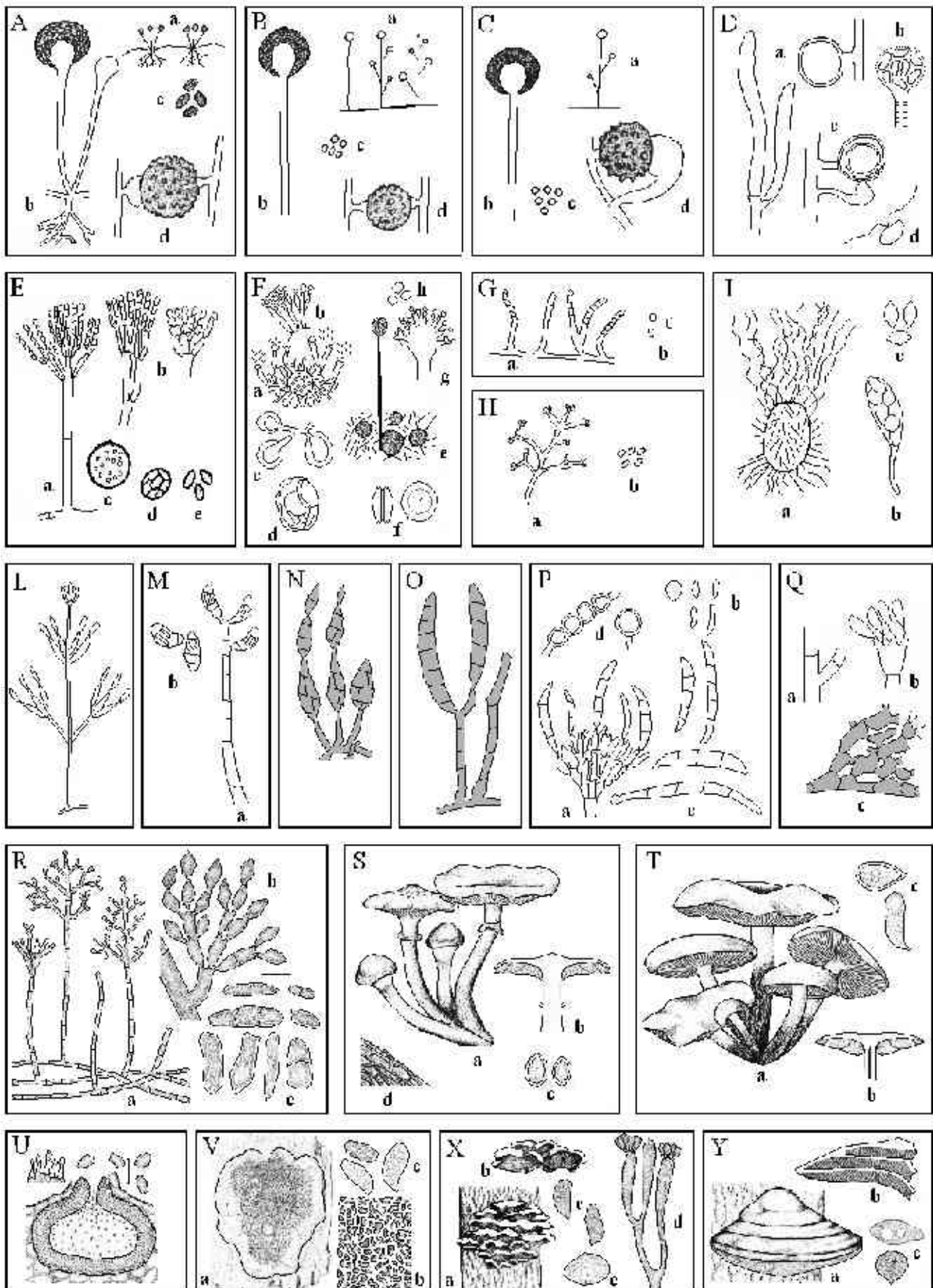


Fig. 47 – Principali generi di funghi viventi nel terreno che operano la degradazione della sostanza organica o danno luogo a processi di ossido-riduzione o di azotofissazione. A) *Rhizopus*: a) habitus vegetativo, b) sporangiofori, c) sporangiospore, d) zigospore. B) *Mucor*: a) habitus, b) sporangioforo, c) sporangiospore, d) zigospore. C) *Zygorhynchus*: a) habitus, b) sporangioforo, c) sporangiospore, d) zigospore. D) *Pythium*: a) zoosporangi, b) zoosporangio con zoospore pronte per essere liberate, c) oogonio con anteridio monoclinale, d) zoospore. E) *Penicillium*: a) conidioforo, b) estremità del conidioforo, c) cleistotecio, d) asco, e) ascospore. F) *Aspergillus*: a) habitus vegetativo, b) fialidi, c) 'hüllen-cellen', d) asco, e) cleistoteci della forma gamica del genere *Eurotium*, f) ascospore, g) estremità distale del conidioforo, h) conidi. G) *Zygorhynchus*: a) habitus conidiale, b) conidi. H) *Trichoderma*: a) conidioforo, b) conidi. I) *Chaetomium*: a) peritecio, b) asco, c) ascospore. L) *Verticillium*: conidioforo. M) *Curvularia*: a) conidioforo, b) conidi. N) *Alternaria*: conidioforo e conidi. O) *Helminthosporium*: conidiofori e conidi. P) *Fusarium*: a) estremità del conidioforo, b) microconidi, c) macroconidi, d) clamidospore. Q) *Rhizoctonia*: a) ifa, b) basidio e basidiospore, c) ife scleroziali. R) *Cladosporium*: a) habitus vegetativo (conidiofori), b) estremità distale del conidioforo, c) conidi polimorfi. S) *Armillariella*: a) carpofori, b) sezione del carpoforo, c) basidiospore, d) placca miceliale. T) *Collybia*: carpoforo, b) sezione del carpoforo, c) basidiospore. U) *Coniothyrium*: picnidio con tessuto conidiogeno e conidi. V) *Merulius*: a) carpoforo, b) imenio basidioforo, c) basidiospore. X) *Stereum*: a) carpofori, b) carpofori visti dal basso, c) carpofori visti dall'alto, d) basidi, e) basidiospore. Y) *Fomes*: a) carpoforo, b) sezione del carpoforo, c) basidiospore.

Nei terreni agrari ed in quelli forestali, i basidiomiceti sono gli agenti più attivi della degradazione della lignina, con il concorso di specie d'ascomiceti e deuteromiceti. I funghi che attaccano la lignina provocano un marciume molle, causato dai generi di ascomiceti *Chaetomium*, *Xylaria*, *Hypoxylon* e dai generi di deuteromiceti *Alternaria*, *Coniothyrium*, *Humicola*, *Stysanus*, oppure un marciume bruno, determinato dalle specie di basidiomiceti *Armillariella mellea*, *Laccaria laccata*, *Merulius lacrymans*, oppure un marciume bianco indotto soprattutto da basidiomiceti dei generi *Pholiota*, *Fomes*, *Stereum*, *Clytocybe*, *Collybia*, da ascomiceti del genere *Psaliota* ed altre specie di ascomiceti prima citati.

I funghi partecipano anche ad altri processi di demolizione della sostanza organica e pertanto si ricordano i funghi emicellulolitici, quali i generi *Penicillium*, *Aspergillus*, *Trichoderma*, *Rhizopus*, che degradano le emicellulose, ed i funghi pectinolitici come i generi *Aspergillus*, *Penicillium*, *Cladosporium*, *Mucor*, *Sclerotinia*, *Rhizopus*.

Questi sono soltanto una piccola parte di specie o generi di microrganismi fungini che partecipano alla decomposizione di alcune sostanze organiche ed alcuni di essi sono piuttosto aspecifici, essendo in grado di partecipare a processi di degradazione di sostanze differenti, oppure di attaccare gli stessi composti intermedi di processi degradativi di diverse sostanze organiche, oppure di aggredire composti diversi di un processo di decomposizione di una sola sostanza.

Ma i funghi sono capaci di fissare l'azoto atmosferico, di partecipare alla mineralizzazione degli elementi nutritivi contenuti in composti organici e di effettuare reazioni d'ossidazione e riduzione degli stessi elementi. Così, funghi del genere *Pullularia*, *Saccharomyces*, *Rhodotorula*, *Lipomyces*, *Candida* sono stati segnalati da

vari ricercatori per la loro capacità di azotofissazione; lieviti, come i generi *Saccharomyces* e *Candida* ed altri microrganismi fungini quali *Aspergillus*, *Penicillium*, *Alternaria* sono capaci di mineralizzare il fosforo organico.

I generi *Curvularia*, *Cephalosporium*, *Cladosporium*, *Coniothyrium* sono in grado di determinare processi di ossido-riduzione del manganese. Molti altri funghi sono invece in grado di metabolizzare e detossificare i principi attivi d'alcuni pesticidi: i generi *Alternaria* e *Penicillium* degradano il principio attivo di Dalapon, *Aspergillus* e *Penicillium* quello di Semesan, *Aspergillus*, *Penicillium* e *Trichoderma* demoliscono la thiourea, *Glomerella cingulata* il tetrametiltiourandisolfuro (TMTD).

Molti funghi altamente specializzati sono capaci di attaccare organismi animali della micro-mesofauna come ad esempio i nematodi, comportandosi da veri predatori. Tali funghi hanno sviluppato dei meccanismi di cattura di piccoli animali, utilizzati come cibo. Alcune specie di basidiomiceti macroscopici sono capaci di attaccare e consumare nematodi, come ad esempio il *Pleurotus ostreatus*, che cresce su legno in decomposizione e possiede ife che secernono una sostanza che anestetizza i nematodi e poi li avvolgono e penetrano nel loro interno. Sembra che il fungo utilizzi i nematodi soprattutto come fonte d'azoto, integrando i bassi livelli di quest'elemento esistenti nel materiale in decomposizione.

Inoltre, alcuni funghi imperfetti microscopici secernono una sostanza vischiosa sulla superficie delle ife che intrappolano protozoi, rotiferi e piccoli insetti di passaggio. Più di 50 specie fungine appartenenti a questo gruppo catturano nematodi. In presenza di questi animali filiformi, le ife del fungo producono dei veri cappi che bruscamente si rigonfiano e, restringendo l'apertura quando un nematode vi passa attraverso, ne operano la cattura. Presumibilmente, il contatto con il corpo dell'animale stimola l'ifa e causa un aumento della pressione osmotica che induce assunzione d'acqua ed aumento di turgore.

L'importanza dei funghi nel terreno diventa ancora maggiore quando si pensa che essi sono in grado di entrare in simbiosi con le radici delle piante a formare così un'associazione denominata da Frank nel 1885 *micorriza*, intendendo con tale termine una sorta di organo delle piante, con morfologia propria e fisiologia particolare. Moltissime associazioni di questo tipo sono state descritte in molte piante appartenenti alle Latifoglie, Conifere, Angiosperme erbacee. Le caratteristiche delle micorrize consistono in un rivestimento o mantello formato da ife fungine che include o riveste le terminazioni delle radici. Le micorrize sono sempre presenti nei sistemi radicali delle piante quando queste crescono nel loro *habitat* naturale, dove soltanto poche radichette possono essere libere dal rivestimento fungino. Inoltre, molte piante ritenute libere dalla colonizzazione fungina, in realtà presentano ife fungine a livello radicale le quali, in questo caso, non danno luogo ad un rivestimento esterno ma hanno un micelio che penetra nella corteccia della radice, attraversa le cellule e collega, in qualche modo, le cellule corticali dell'apice radicale con il terreno circostante. Va anche detto che le conoscenze, per quanto progredite sull'argomento, non si possono ancora considerare complete e molte specie di piante, soprattutto quelle oggetto di coltivazione, debbono essere ancora esplorate sotto questo punto di vista. In linea generale, si può senz'altro affermare che le micorrize sono presenti nella maggior parte dei gruppi di piante vascolari e solo poche famiglie di angiosperme ne sono tipicamente prive o le formano assai di rado e tra queste vi sono le *Brassicaceae* e le *Cyperaceae*.

Fra le radici delle piante ed i funghi del terreno esiste una vasta gamma di relazioni. Tutti i rapporti, nei quali la pianta non manifesta una sintomatologia patologica correlata alla presenza degli organismi fungini, rientrano nell'ambito del tipo delle simbiosi micorriziche. E' possibile distinguere le micorrize *ectotrofiche* o *ectomicorrize*, dotate di

un mantello fungino esterno che ricopre l'apice radicale, e le micorrize *endotrofiche* o *endomicorrize*, caratteristiche d'altre piante, mancanti del mantello fungino esterno, caratterizzate di penetrazione ifale intercellulare ed intracellulare, molto più diffuse delle precedenti e rinvenute sulle piante più disparate (Angiosperme, Gimnosperme, Briofite, Pteridofite). Fra i due tipi di micorrize è possibile rilevare tutta una gamma intermedia di rapporti tra il fungo e le radici, tanto da far individuare un terzo tipo rappresentato dalle micorrize *ectoendotrofiche*.

Le micorrize ectotrofiche delle diverse piante sono simili nella struttura fondamentale, tanto che è possibile generalizzare circa la loro funzione. Al contrario, non sempre è possibile generalizzare circa le funzioni delle micorrize endotrofiche. Le ectomicorrize sono tipiche di certi gruppi di piante arboree ed arbustive distribuite prevalentemente nelle regioni temperate. Gli alberi, che crescono in prossimità del limite della vegetazione arborea in varie parti del mondo, spesso formano ectomicorrize con il risultato di migliorare la resistenza alle condizioni ostili, fredde e secche presenti al limite delle zone di sviluppo delle piante. Nelle micorrize ectotrofiche il fungo esplora un grosso volume di terreno intorno alla radice e svolge un importante ruolo nel trasferimento degli elementi nutritivi, anche in forma organica, alla pianta ospite. I peli radicali sono spesso assenti, perché la loro funzione è svolta dalle ife fungine. Per lo più le ectomicorrize sono formate da basidiomiceti, ma in certi casi sono coinvolti anche gli ascomiceti. Le associazioni ectomicorriziche coinvolgono almeno 5.000 specie diverse di microrganismi fungini e sono caratterizzate da un'alta specificità.

Le endomicorrize sono notevolmente le più comuni, poiché si trovano in circa 80% delle piante vascolari. I componenti fungini appartengono principalmente alla divisione *Zygomycota* e fra questi sono note circa 100 specie fungine diffuse in tutto il mondo. Risulta molto evidente che questi funghi non hanno un'elevata specificità, penetrano le cellule corticali della radice dove formano gomitoli, rigonfiamenti o piccole ramificazioni e possono anche estendersi nel suolo circostante, alla stessa stregua delle micorrize ectotrofiche. I rigonfiamenti, che possono essere sia intracellulari sia intercellulari, sono chiamati *vescicole*, mentre le sottili ramificazioni sono esclusivamente intracellulari e sono dette *arbuscoli*. Per questo le endomicorrize di questo tipo sono spesso denominate micorrize *vescicolo-arbuscolari* (V/A).

Le endomicorrize sono importanti nelle regioni tropicali, dove le particelle terrose tendono a caricarsi positivamente e, pertanto, trattengono fortemente gli anioni fosfato che diventano disponibili per le piante in quantità progressive limitate.

Al contrario, la maggioranza dei suoli delle regioni temperate sono carichi negativamente e quindi gli anioni solubili di fosforo sono massivamente resi disponibili al sistema assorbente delle piante.

La capacità delle micorrize di assorbire e trasportare il fosforo del suolo è stata dimostrata in esperimenti dove si è usato il ^{32}P . Piante micorrizzate di cipolla sono state coltivate in speciali contenitori con piccole aperture che consentivano alle ife fungine, ma non alle radici, di crescere in un volume di suolo separato. Il fosforo radioattivo veniva quindi aggiunto a differenti distanze dalla radice e veniva poi trovato nelle radici e nel germoglio delle piante di cipolla inoculate, ma non in quelle non micorrizzate o in quelle dove le connessioni con le ife fungine erano state interrotte. Le piante coltivate sono differentemente dipendenti dai funghi micorrizici, per quanto riguarda l'assorbimento del fosforo dal terreno.

L'aumento percentuale di crescita, misurato per le piante micorrizzate rispetto alle piante non micorrizzate, ha dato luogo a valori significativi per il grano (220%), il mais (122%), la cipolla (315,5%), la fragola (250%). In relazione a quanto detto, nei sistemi

agricoli dove le concimazioni con fertilizzanti minerali trovano delle limitazioni (agricoltura biologica), le endomicorrize potrebbero svolgere un ruolo cruciale, inducendo in questi terreni la massima disponibilità di fosforo per le piante coltivate e rappresentando un'alternativa alla massiccia somministrazione di fosforo, con una sostanziale riduzione di costo ed energia per le coltivazioni. Una migliore conoscenza delle relazioni tra i partner delle micorrize è certamente una chiave per ridurre la quantità di fertilizzanti, soprattutto i fosfati, necessari nei terreni agricoli per ottenere rese produttive soddisfacenti e per controllare le comunità vegetali naturali.

L'intensità della colonizzazione micorrizica varia in funzione del tipo di terreno ed è molto elevata nei terreni acidi (d'altra parte è noto che i funghi sono acidofili).

La formazione di radici micorriziche è favorita da condizioni di carenza in elementi nutritivi (specialmente azoto) e da un'intensa attività fotosintetica e ciò ha fatto ritenere che il contenuto in glucidi delle radici sia un fattore d'importanza decisiva. Ma anche la presenza d'altri microrganismi in prossimità delle radici, producendo essi sostanze stimolanti od inibenti, può favorire o meno la crescita e lo sviluppo dei funghi delle micorrize.

Tali funghi utilizzano come sorgente di carbonio preferibilmente gli zuccheri semplici e, contrariamente alle altre specie dei generi cui appartengono, non metabolizzano la lignina e soltanto pochi sono capaci di degradare la cellulosa.

Come sorgente d'azoto essi hanno bisogno di aminoacidi e di altri fattori di crescita.

Queste caratteristiche fanno dei funghi micorrizici degli organismi viventi in simbiosi mutualistica e non antagonistica ed incapaci di arrecare danno alle piante, proprio perché non sono in grado di demolire la cellulosa e la lignina costituenti la struttura delle piante.

Con l'associazione mutualistica, sia l'ospite sia l'ospitatore traggono un reciproco beneficio dalla convivenza: il fungo riesce più agevolmente a soddisfare le proprie esigenze nutritive in fatto di sorgenti di carbonio e fattori di crescita, mentre la pianta trae benefici effetti a livello della nutrizione, perché migliora l'assorbimento degli elementi minerali quali l'azoto ed il fosforo.

Il migliore assorbimento è una prerogativa di grande utilità nei terreni poveri ed è dovuta al fatto che le radici micorriziche hanno, in confronto a quelle non colonizzate, una superficie assorbente maggiore e perché dal micelio si dipartono le ife che invadono il terreno circostante.

Nelle radici micorriziche, l'apparato assorbente viene tutto o in parte sostituito da quello del fungo ed è a quest'ultimo che è devoluta la funzione primaria di assumere dal suolo gli elementi nutritivi, poi traslocati all'interno della radice.

Il fungo assume dal terreno composti azotati organici e dopo averli mineralizzati cede l'azoto inorganico alle piante.

A causa dell'intensa attività metabolica, il simbionte contribuisce validamente alla mobilitazione degli elementi nutritivi riuscendo a trarre anche da terreni molto poveri quei nutrienti delle piante (ad esempio il fosforo) presenti nel substrato anche in concentrazioni molto basse.

Molte piante crescono normalmente quando esiste nel terreno una buona disponibilità di elementi nutritivi, soprattutto fosforo. Tuttavia, se questi elementi sono presenti in quantità limitata, le piante prive di micorrize crescono stentatamente o non crescono affatto. Il ruolo delle micorrize nel trasferimento diretto del fosforo dal suolo alle radici delle piante è stato verificato sperimentalmente.

A sua volta, la pianta fornisce carboidrati al fungo simbiote. Una delle più affascinanti osservazioni sulle micorrize è che esse possono funzionare come ponti, attraverso cui i prodotti della fotosintesi, il fosforo e forse altre sostanze passano da una pianta ospite ad un'altra.

Il fosforo sembra essere un fattore limitante l'insediamento delle micorrize (micorrizia), quando è presente nel suolo in elevati quantitativi.

Da esperienze di alcuni ricercatori, che coltivarono piante di pomodoro in una miscela sterile di sabbia di duna e sabbia di orto, in presenza ed assenza di un inoculo costituito da spore di un fungo endofita selezionato, sottoposte a differenti livelli quantitativi di fosforo, risultò che nelle tesi con il più basso quantitativo di fosforo la colonizzazione fu di 80-90%, a fronte del valore di 60-70% ottenuto nelle tesi con il più elevato quantitativo di fosforo. Inoltre, l'assorbimento dei fosfati fu assai più equilibrato nelle piante micorrizzate.

Le micorrize, oltre ad essere importanti specialmente per l'assorbimento del fosforo, svolgono un ruolo favorevole anche nell'assorbimento dello zinco, del manganese e del rame. Questi elementi nutritivi oligodinamici sono relativamente immobili nel suolo e zone d'esaurimento si formano molto presto intorno alle radici ed ai peli radicali. L'intreccio ifale delle micorrize si espande per parecchi centimetri al di fuori delle radici colonizzate e, pertanto, un maggior volume di suolo può essere sfruttato con maggiore efficienza.

In linea generale gli esperimenti di inoculazione indicano una maggiore produzione vegetale nelle piante inoculate con funghi micorrigeni e che le stesse piante contengono un maggior quantitativo di fosforo, potassio, calcio, magnesio, ferro e meno azoto e manganese rispetto alle piante non inoculate.

Anche altri benefici possono provenire, alla crescita delle piante coltivate, dalla presenza di micorrize e questi potrebbero essere rappresentati da una diminuzione della suscettibilità all'attacco dei patogeni del suolo (in relazione all'insorgenza di un eventuale antagonismo con i microrganismi fitopatogeni), da una maggiore tolleranza per i suoli acidi, da un probabile aumento di resistenza allo stress legato alla siccità. In definitiva, le notizie relative alla simbiosi micorrizica suggeriscono la necessità di approfondire le ricerche che dovrebbero riguardare tutti gli aspetti del complesso fenomeno, allo scopo di far luce su molti punti che sono ancora oscuri.

Alghe

Le alghe, grande divisione di vegetali appartenenti alle *Tallofite*, sono organismi autotrofi con cromatofori colorati in verde dalla clorofilla o, in alcuni gruppi, colorati diversamente per la presenza di pigmenti gialli o bruni (ficofoina) oppure rossi o violetti (ficoeritrina o ficocianina). Sotto il profilo delle condizioni biologiche del terreno, rivestono una certa importanza le forme microscopiche, le microalghe, rappresentate da alghe unicellulari, appartenenti principalmente alle classi delle *Cyanophyceae* o alghe azzurre, delle *Chlorophyceae* o alghe verdi, delle *Bacillariophyceae* o diatomee (alghe brune), delle *Xanthophyceae* o alghe giallo-verdi, delle *Euglenophyceae* o alghe simili a protozoi. Tuttavia, gli studi citologici e sulla riproduzione hanno mostrato differenze così profonde tra i diversi raggruppamenti da rendere piuttosto instabile nel tempo ogni classificazione tassonomica.

Il termine alghe si conserva ancora nel linguaggio scientifico per indicare,

complessivamente, i gruppi vegetali in cui esse sono distinte, ma non si usa più nella botanica sistematica moderna.

Con particolare riguardo alle alghe azzurre o Cianoficee, va detto che in passato esse erano chiaramente inserite nel gruppo dei protisti fotosintetici o alghe, mentre oggi sono considerate dei batteri e specificamente dei cianobatteri, per il loro colore blu-verde e per alcune caratteristiche particolari.

E' un raggruppamento in forte revisione tanto che dei 7.500 nomi proposti per altrettante specie di Cianoficee, studi sperimentali suggeriscono che possano esistere in realtà non più di 200 specie non simbiotiche. Ad esempio la specie *Microcoleus vaginatus*, che vive nel suolo umido di un vasto areale dell'Antartico, ha rivelato che nelle diverse condizioni ambientali può subire cambiamenti così estremi da essere attribuita a decine di specie diverse.

In virtù della loro capacità di fissare azoto le alghe azzurre, insieme ai licheni, le epatiche ed altri organismi con cui vivono in simbiosi, hanno un ruolo importante nella colonizzazione dei suoli e rocce nudi.

Molti depositi calcarei noti come *stromatoliti*, che possono risalire fino a 2,7 miliardi d'anni fa, sono prodotti da Cianoficee che inducono la precipitazione di composti ricchi di calcio.

Oggi gli stromatoliti continuano a formarsi solo in pochi siti e la loro abbondanza allo stato fossile dimostra il ruolo decisivo che ebbero questi microrganismi nell'innalzamento della concentrazione di ossigeno libero nell'atmosfera primitiva del nostro pianeta.

Le alghe microscopiche viventi nel terreno e più comunemente osservate appartengono ai generi *Oscillatoria*, *Phormidium*, *Nostoc*, *Anabaena*, *Cylindrospermum* del gruppo delle Cianoficee, ai generi *Chlorella*, *Ulothrix*, *Stichococcus*, *Chlorococcum* del gruppo delle Cloroficee, ai generi *Navicula*, *Nitzschia*, *Hantzschia*. Queste alghe sono molto numerose e raggiungono la densità di 25.000-30.000 per grammo di terreno naturale, almeno negli strati più superficiali di suolo esposti alla luce, ma possono vivere anche negli strati più profondi, con poca o senza luce. In quest'ultimo caso, però, si contano meno di 50-60 alghe per grammo di substrato.

Questi microrganismi sono molto sensibili all'azione del freddo e della siccità e la densità di popolazione si abbassa notevolmente nei mesi invernali e sul finire dell'estate. Un buon grado d'umidità ed una temperatura moderata favoriscono il loro sviluppo e per questo motivo la maggior parte dei terreni, opportunamente inumiditi ed esposti alla luce (anche attraverso le lavorazioni), provvisti di una media quantità di calore ambientale, danno luogo ad un abbondante sviluppo di uno strato algale superficiale.

Le alghe, in qualità di organismi fotosintetici, sono abbondanti in tutti gli ambienti accessibili alla luce e con adeguata umidità.

Molte di esse, pur dotate di pigmento fotosintetico, sono anche capaci di utilizzare composti organici e per questo possono crescere al buio o in assenza di anidride carbonica, anche se la crescita è, generalmente, inferiore al buio che alla luce ed è in relazione alla natura del composto organico.

L'andamento dello sviluppo di molte alghe non è influenzato dalla presenza di carbonio organico, quando la luce e l'anidride carbonica nell'ambiente sono in quantità tale da saturare il processo fotosintetico e, soltanto in condizioni di deficienza di luce, si ha assimilazione di carbonio organico, in misura tale da mantenere il tasso di crescita al livello realizzato con un'attività della fotosintesi ai livelli massimi.

L'autotrofismo delle alghe si realizza, oltre che nel ciclo del carbonio, anche

nell'assimilazione dell'azoto.

Questo macroelemento può essere assunto sotto forma ammoniacale e nitrica e può essere utilizzato finanche come azoto elementare oppure organico. Sono noti casi in cui la nutrizione azotata è sostenuta da combinazioni minerali con il concorso di aminoacidi come l'istidina, la prolina, la valina e l'alanina.

Va anche detto che non tutti gli studiosi sono d'accordo nell'ammettere la capacità delle alghe, da sole, di metabolizzare l'azoto elementare dell'aria e molti ritengono che questi microvegetali, crescendo nel terreno insieme con gli azotobatteri, ne favoriscano l'attività azotofissatrice, fornendo, come materiali energetici, composti organici da essi anabolizzati.

Lo sviluppo di questa sorta di simbiosi che si viene ad instaurare comporta il rifornimento della sola acqua e sali minerali da parte del terreno, mentre il carbonio e l'azoto derivano dall'aria atmosferica e tellurica.

Questo meccanismo potrebbe avere un'enorme importanza nella genesi del suolo e per la prima produzione del terreno a partire dalla roccia madre, tanto che, bisogna ricordarlo, le alghe esercitano un'azione solubilizzante sui materiali calcarei e favoriscono la disaggregazione e la decomposizione delle rocce, con la formazione, per l'appunto, del terreno agrario. A tal proposito si ricorda l'associazione simbiotica tra un'alga ed un fungo che va a costituire quei licheni di cui si è accennato all'inizio, a proposito della decomposizione delle rocce nel processo pedogenetico indotto da agenti biologici.

Le alghe azotofissatrici o compartecipanti al processo di azotofissazione appartengono alle Cianoficee, ordine *Nostocales*, generi *Nostoc* (ad esempio la specie *N. commune*), *Anabaena* (la specie *A. cylindrica*), *Cylindrospermum* (la specie *C. muscicola*), *Anabaenopsis*, *Aulosira*, *Calotrix*, *Tolypotrix* ed ordine *Stigonematales*, genere *Mastigocladus*.

Esse danno luogo ad un elevato grado di autotrofia, poiché operano in due fondamentali processi biochimici rappresentati dalla fotosintesi e dall'azoto-fissazione. A proposito di quest'ultimo importantissimo processo, la fissazione dell'azoto nei cianobatteri spesso avviene nelle *eterocisti*, cellule ingrossate presenti nelle specie filamentose, aventi una parete identica a quella delle cellule normali ma provviste di un involucro bistratificato, costituito esternamente da un polisaccaride ed internamente da glicolipidi.

Nei terreni italiani la maggiore densità di microalghe si ritrova nel periodo primaverile-estivo ed alla profondità di 3 cm, con un valore che oscilla da 120.000 a 200.000 circa alghe per grammo di terreno, valore che si riduce a 60.000-80.000 alla profondità di 25 cm, fino a circa 30.000 a 40 cm di profondità, nello stesso periodo. Alla profondità di 3 cm non si registrano differenze tra le cariche algali di un terreno argilloso e sabbioso, differenze che invece si manifestano alle profondità di 25 e 40 cm, con valori più elevati nel terreno sabbioso.

La composizione e la quantità di alghe nel terreno sono in relazione con la copertura vegetale, nel senso che alcune coltivazioni (ad esempio la barbabietola) sono in grado di incrementare la popolazione di alghe nel terreno.

L'accumulo di alghe nella rizosfera avviene sia per una loro adesione meccanica alle radici, con il loro spostamento allo spostarsi delle radici verso gli strati più profondi, sia perché le alghe utilizzano gli essudati radicali come sorgente suppletiva, ma talvolta unica, nutrizionale.

La figura 48 è riporta lo schema della morfologia di alcune microalghe del suolo.

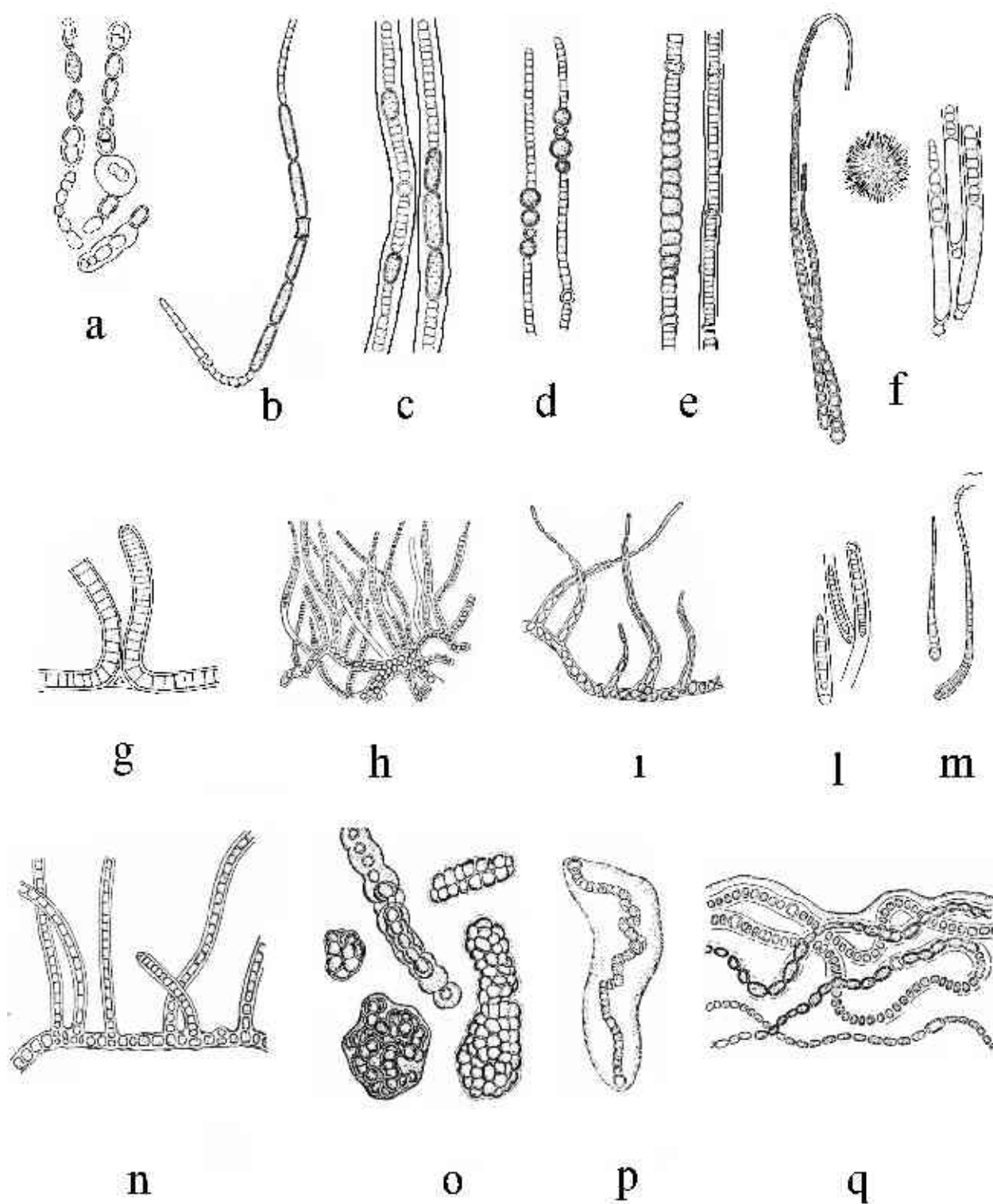


Fig. 48 – Schema della morfologia di alcune specie di microalghe del terreno. a) *Anabaena azollae*; b) *Anabaena cylindrica*; c) *Anabaena laxa*; d) *Anabaena oscillarioides*; e) *Nodularia harveyana*; f) *Gloeothrichia echinulata*; g) *Scytonema arcangelii*; h) *Fischerella muscicola*; i) *Mastigocladus laminosus*; l) *Calothrix brevissima*; m) *Calothrix clavata*; n) *Hapalosiphon fontinalis*; o) *Nostoc punctiforme*; p) *Nostoc paludosum*; q) *Nostoc muscorum*.

Molti studi sono stati condotti sulla reciproca attività stimolante che si verifica tra le piante e le alghe. In prossimità delle radici di piante di pisello, la crescita e la densità della popolazione algale sono tanto più elevate quanto più intensa è la crescita delle radichette della leguminosa, in relazione alla maggiore presenza d'anidride carbonica liberata durante la respirazione delle radici. Le alghe secernono nell'ambiente circostante molte sostanze come i sali dell'acido malico, ossalico, tartarico, succinico e citrico, oltre polipeptidi ed aminoacidi solubili, sostanze biologicamente attive quali antibiotici, vitamine (vitamine B₂ e B₁₂) ed auxine e ciò comporta sicuramente un'influenza diretta sulle piante superiori e sulle caratteristiche del terreno. Le alghe, in condizioni d'elevata umidità e favorevoli allo sviluppo delle fitopatie fungine, sono in grado di proteggere le piante. Numerosi studi sono stati effettuati sulla competizione tra le alghe e le piante, in particolare riguardo la nutrizione minerale (ambedue sono organismi autotrofi). Nel caso della competizione per il fosforo si è accertato che essa è auspicabile poiché le alghe assumono questo macroelemento, quando è allo stato di disponibilità, dalla sfera d'assorbimento della pianta, evitandone la perdita e poi gradualmente lo cedono in forma assimilabile. Le piante di riso, per esempio, assorbono il fosforo da materiale algale. Nel terreno agrario, inoltre, le alghe sono capaci di assimilare l'azoto nitrico ed ammoniacale in forma organica e ciò evita la dispersione per dilavamento e per evaporazione. Le piante sono in grado di utilizzare l'azoto fissato dalle alghe che è equivalente a quello nitrico, anche se l'azoto delle alghe fresche è meno accessibile dell'azoto delle piante che deriva dalla loro morte e successiva macerazione. La concimazione fogliare con microelementi può influenzare la crescita delle alghe attraverso le radici. A tal proposito, studi condotti hanno dimostrato che in coltivazioni di cetriolo, inoculate con *Nostoc muscorum*, la crescita dell'alga e la concentrazione d'azoto sono risultate essere correlate alla somministrazione fogliare di sali di molibdeno e di boro. Non è possibile ravvisare, pertanto, fenomeni di concorrenza nutrizionale tra le piante coltivate e le alghe ed in linea generale si può affermare che, in caso di carenza d'elementi nutritivi nel terreno, predominano le piante superiori, mentre in terreni ricchi in elementi nutritivi nessuna competizione è stato possibile registrare. In definitiva, come conseguenza dello sviluppo delle alghe, una riserva non indifferente di materia e d'energia si accumula che, in seguito alla morte ed al dissolvimento delle loro cellule, può essere messa a disposizione di altri esseri viventi del suolo ed anche delle piante coltivate. Si ritiene che, in certi terreni nei quali le radici possono trovare condizioni poco favorevoli per la respirazione, l'emissione di abbondanti quantità d'ossigeno da parte delle alghe, durante il processo di fotosintesi ed il conseguente aumento della concentrazione di tale gas nella soluzione circolante, sicuramente manifesta un effetto favorevole sullo sviluppo delle piante coltivate. La coltura artificiale delle alghe è abbastanza facile e può attuarsi in liquidi di coltura puramente minerali, dove l'azoto si trova in forma di sale ammonico o meglio di nitrato. Ricerche effettuate da Florenzano hanno consentito di mettere a punto metodi di coltura di alghe sicuramente utili (*Nostoc punctiforme* e *Anabaena cylindrica*) che assicurano un raccolto di alghe di 7-8 g di massa secca per metro quadrato, ogni giorno. Le alghe selezionate ottenute possono essere innestate nel suolo, fino alla semina, con il risultato di aumentare la produttività delle piante coltivate (in risicoltura) oppure di regolare lo sviluppo dell'algoflora del suolo, incrementando le specie utili (ad esempio quelle azotofissatrici come le *Nostocales* dei generi *Nostoc*, *Anabaena* e *Cylindrospermum*) e reprimendo quelle nocive (dannose nelle risaie), appartenenti principalmente alle Cloroficee, ma anche Feoficee (le diatomee in particolare) e Cianoficee ed ai generi *Hydrodictyon* (in particolare, la specie *H. utriculatum*), *Euglena*, *Trachelomonas*, *Pediastrum*, *Oedogonium*, *Spyrogira*, *Closterium*, *Cosmarium*, *Pleurotenium*, *Oscillatoria*, *Schenedesmus*, *Spheroplea* oppure utilizzando le stesse alghe

inoculate come indicatori biologici nella valutazione della fertilità e nella determinazione delle eventuali necessità del terreno in fatto di concimazioni. L'inoculazione di alghe selezionate nel terreno (*algalizzazione*) ha dato importanti risultati di miglioramento della resa produttiva, soprattutto in risicoltura (l'incremento produttivo ha raggiunto il 30% circa) e con l'impiego di specie algali come *Tolypothrix tenuis* e *Aulosira fertilissima*. Le alghe somministrate possono attivamente moltiplicarsi oppure restano temporaneamente vive nel terreno ed esercitano un'influenza benefica nel suolo o direttamente sulla pianta attraverso la loro attività vitale. Masse di alghe raccolte alla superficie di bacini idrici ed in stato di decomposizione possono anche utilizzarsi come fertilizzante organico, ma non si tratta di algalizzazione. Il metodo dell'algalizzazione consiste nell'impiegare alghe vive in grado di moltiplicarsi e la cui quantità d'uso è dell'ordine di grandezza di pochi chilogrammi per ettaro, mentre, in qualità di concime organico, il quantitativo da somministrare è dell'ordine di tonnellate per ettaro. In linea generale si può affermare che per la regolazione dello sviluppo delle microalghe non esistono specie di alghe del terreno nocive e la stimolazione di ogni complesso algale autoctono, come incentivo della sostanza organica, è sempre da auspicare. Lo stesso processo di coltivazione del suolo conduce all'arricchimento di alghe azotofissatrici appartenenti alle *Nostocales*. Questo è un ordine di alghe che è un buon indicatore della fertilità e la cui presenza nel terreno si può considerare come uno dei fattori di razionale coltivazione. Tutti i metodi agronomici che accrescono la fertilità del suolo contribuiscono allo sviluppo delle alghe ed al tempo stesso incrementano la partecipazione delle alghe al miglioramento della stessa fertilità. Nei terreni acidi e calciocarenti, la calcitazione accresce la varietà delle specie di alghe ed incrementa fortemente lo sviluppo delle alghe azotofissatrici. Il gruppo di microalghe del terreno possiede caratteristiche fisiologiche e nutrizionali che hanno molti punti in comune con quelle delle piante coltivate e ciò consente l'impiego delle alghe (soprattutto le specie della microflora indigena, autoctona) quali organismi test per ottenere risposte associabili a quella che sarà la risposta della pianta, senza rinunciare ai vantaggi offerti dai metodi di analisi microbiologica (rapidità dell'analisi, riproducibilità dei risultati). Così, per esempio, le alghe possono servire per determinare gli elementi minerali che il terreno contiene in forma disponibile per le piante. Questo bidosaggio potrebbe consistere nell'inoculare una coltura di alghe del suolo su di un substrato minerale, senza l'elemento la cui disponibilità si vuol determinare ed addizionato di una certa quantità di terreno; dopo un certo tempo si misura la crescita algale e si confronta con quella di una coltura effettuata nello stesso mezzo, contenente anche l'elemento per il quale si sta effettuando il bidosaggio.

Prima di concludere quest'argomento, va ancora detto che le alghe possono arrecare anche danni, ad esempio ad una risaia, ma anche ad una coltura idroponica o ad un qualsiasi sistema di coltivazione fuori suolo (ad esempio il sistema Grodan), sia pure in modo del tutto meccanico, come fanno quelle alghe filamentose che, in primavera, quando la temperatura ne favorisce la crescita, causano la formazione di strati superficiali schiumosi ed in grovigli che ostacolano il movimento dell'acqua, il radicamento, lo sviluppo delle piantine e danno luogo ad un'estrema competizione per l'aria e per gli elementi nutritivi. La lotta contro queste alghe dannose può diventare necessaria e si effettua facendo l'asciutta della coltura oppure innalzando l'acqua ed asportando manualmente gli ammassi di alghe. L'impiego di solfato di rame rappresenta un intervento chimico ad azione algicida molto valido, da usarsi in quantità tale da determinare una concentrazione di 1:150.000 o 1:200.000, oppure alla dose di 1-3 kg per ettaro ed al giorno e per 15-20 giorni, oppure mediante irrorazione di una soluzione al 10% sulla patina algale quando le alghe sono come sottili veli.

Licheni

Si è già parlato di questo tipo di associazioni vegetali a proposito delle azioni biologiche riguardanti il processo di pedogenesi.

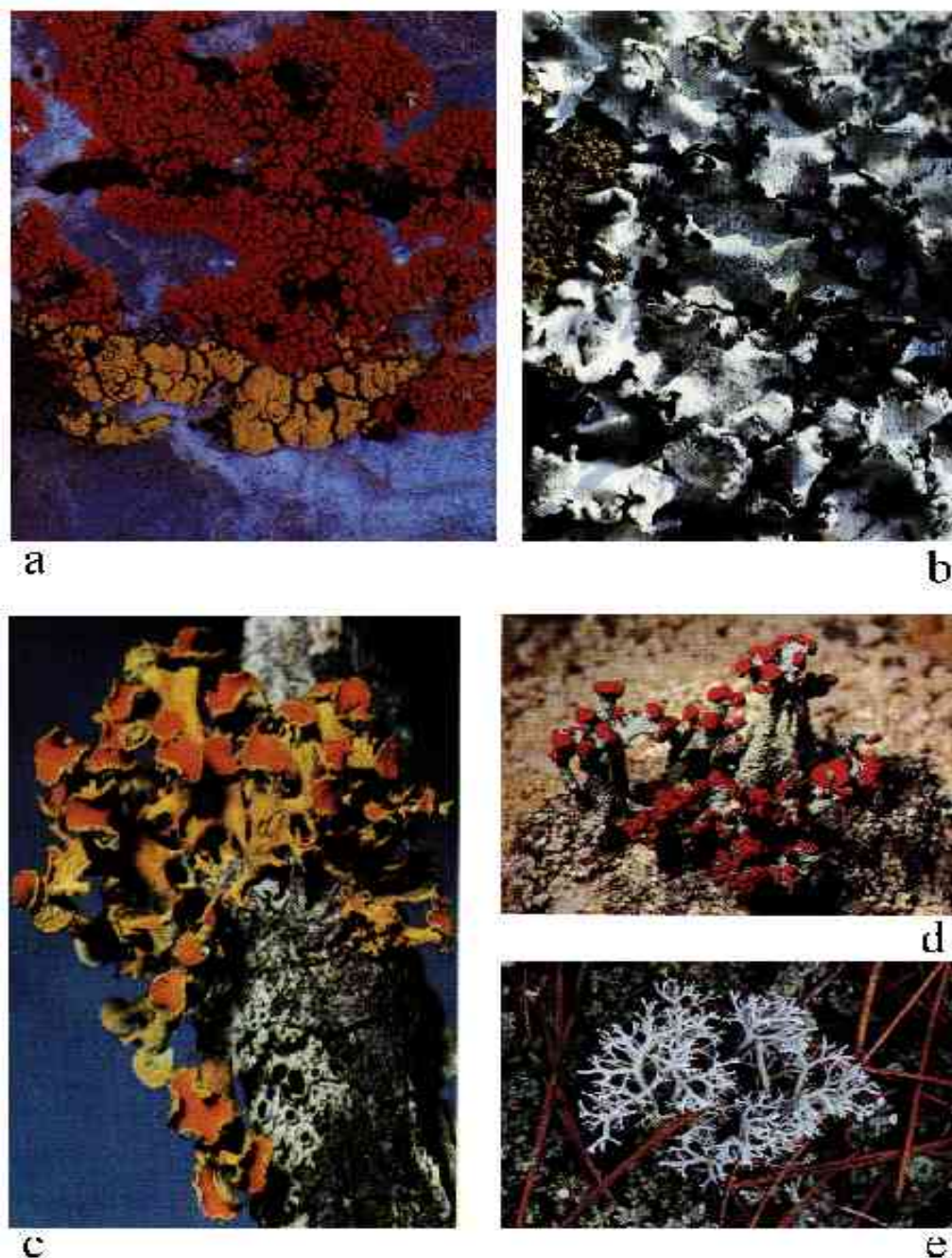


Fig. 49 – In natura i licheni hanno ampia diffusione, dai deserti alle regioni artiche, e possono crescere sulla roccia nuda, sui tronchi, sui pali delle siepi e sui picchi alpini sferzati dal vento. Nella figura si può osservare un mosaico di licheni crostosi su una superficie rocciosa (a), *Parmelia perforata* che è un lichene foglioso e frondoso che cresce sui rami degli alberi morti (b) ed alcuni licheni fruticosi come *Teleschistes chrisophthalmus* (c), *Cladonia cristatella* (d) e *Cladonia subtenuis* (e).

Nella figura 49 sono riportate le specie di certi licheni, alcuni dei quali (figura 49a) svolgono un ruolo importante nella decomposizione e disaggregazione delle rocce; altri licheni crescono sui rami di alberi morti, come *Parmelia perforata* (figura 49b) o sono tipicamente fruticosi come *Teleschistes chrisophthalmus* (figura 49c), *Cladonia cristatella* (figura 49d) e *C. subtenuis* (figura 49e).

In relazione alle conoscenze acquisite sugli altri organismi del terreno, sono ora riportate alcune notizie riguardanti la morfologia, la biologia e la fisiologia di queste associazioni, le quali giocano un ruolo importante nel suolo e nella formazione del terreno sulle superfici rocciose, permettendo così quella che si chiama successione biologica, vale a dire i cambiamenti nella composizione delle comunità vegetali, secondo un'ordinata sequenza nel tempo e nello spazio, di portata planetaria. I licheni sono associazioni simbiotiche fra ascomiceti e certi generi di alghe verdi e cianobatteri. Tuttavia, sono noti una dozzina di basiodiomiceti che stabilisce un rapporto con le alghe, anche se i funghi in questione sono liberi e non presentano somiglianze con altri funghi costituenti i licheni. I componenti fotosintetici di queste associazioni (le alghe ed i cianobatteri) forniscono i nutrienti organici, mentre i funghi, in cambio, danno la protezione verso le condizioni ambientali estreme. In virtù di questa simbiosi mutualistica, i licheni sono capaci di vivere negli habitat più inospitali. Circa 20.000 specie di funghi ascomiceti, di vario aspetto, diverse dalle circa 30.000 specie costituenti gli ascomiceti liberi, entrano a far parte dell'associazione lichenica. Attualmente sono riconosciuti 26 generi diversi di organismi fotosintetici associati a questi funghi ed i più comuni sono le alghe verdi del genere *Trebouxia*, *Pseudotrebouxia* e *Trentepohlia* oppure il cianobatterio *Nostoc*; nel 90% circa dei licheni l'alga appartiene a questi generi.

I licheni sono molto diffusi in natura e si trovano dalle regioni desertiche alle zone artiche, crescono sul suolo nudo, sui tronchi, sulle rocce esposte al sole, sui picchi alpini. Alcuni licheni sono piccoli e delicati da essere quasi invisibili ad occhio nudo, mentre altri possono ricoprire vaste superfici in spessi strati. I licheni sono spesso i primi organismi che colonizzano nuove superfici rocciose e molti di essi arricchiscono il suolo di azoto fissato e rappresentano la principale fonte di azoto in molte regioni.

Da molto tempo i licheni suscitano l'interesse degli studiosi di biologia, per l'interesse che desta l'associazione tra il fungo e l'alga o la cianoficea. Il partner fungino sembra avere un ruolo predominante nel determinare la forma del lichene.

Alcuni licheni producono i *soredi*, costituiti da ife del fungo e cellule delle alghe. I funghi ascomiceti dell'associazione lichenica producono corpi fruttiferi simili ai soredi. I licheni più semplici sono formati da una crosta d'ife fungine intrecciate con alghe, mentre i licheni più complessi presentano un tallo di forma definita, con una caratteristica struttura interna. In questi ultimi è possibile distinguere la *corteccia superiore* formato da uno strato protettivo di ife con pareti molto gelificate; lo *strato algale*, sottostante al primo, costituito da alghe frammiste ad un lasso reticolo di ife con pareti sottili; la *medulla*, uno strato midollare, ricco di ife ingrossate, ammassate e debolmente gelificate, rappresenta circa i due terzi dello spessore del tallo ed ha funzioni di accumulo di sostanze di riserva; la *corteccia inferiore*, più sottile di quella superiore e ricoperta di sottili estroflessioni che assicurano l'ancoraggio al substrato.

I licheni possono sopravvivere in condizioni ambientali proibitive e ciò è dovuto ad un certo tipo di protezione che il fungo è in grado di assicurare.

Una volta si riteneva che il fungo proteggesse l'alga o il cianobatterio dall'essiccamento. Oggi sembra assodato che il principale fattore della sopravvivenza dei licheni sia la loro capacità di disidratarsi con gran rapidità. In condizioni naturali, i

licheni, spesso, hanno un contenuto in acqua che va dal 2 al 10% del peso secco, valori che sono tipici di un organismo disidratato.

I licheni possono sopportare un elevatissimo irraggiamento solare e temperature estreme, essendo capaci, in tali condizioni, di perdere quasi tutta l'acqua e di entrare in uno stato di vita latente. A tal punto si ha l'arresto della fotosintesi, poiché lo strato corticale superiore, diventando più spesso ed opaco, blocca il passaggio della luce. La riprova che è proprio la disidratazione che protegge il lichene dalle condizioni ambientali difficili, è data dal fatto che un lichene umido è gravemente danneggiato da intensità luminose o da temperature che, in condizioni di disidratazione, non provocano alcun danno. Un lichene secco, rigido, crostoso e fragile, se bagnato dalla pioggia, assorbe rapidamente acqua fino a 3-35 volte il proprio peso e diviene morbido e plastico perché assorbe avidamente acqua per semplice imbibizione.

L'intensità dell'attività fotosintetica misura la vitalità del lichene e raggiunge i massimi valori dopo l'imbibizione idrica, allorché inizia la disidratazione. Quando il contenuto idrico è pari al 65-90% del massimo contenuto d'acqua che il lichene può assumere, si verifica il punto più elevato della velocità di fotosintesi; sotto tale valore e per ulteriore disidratazione si registra una diminuzione fotosintetica. Dove l'acqua è carente, la fotosintesi dei licheni avviene soltanto nelle ore del mattino, in presenza di precipitazioni occulte (rugiada). Per questi motivi la crescita dei licheni è molto lenta e fa registrare valori medi di 0,1-10 mm per anno.

Interessante è la nutrizione dei licheni i quali assorbono solo pochi elementi minerali dal suolo, mentre la maggior parte è ricavata dall'aria e dall'acqua piovana, con successiva concentrazione. Per questa attività i licheni svolgono un ruolo importante nel funzionamento degli ecosistemi, poiché, non avendo la capacità di eliminare le sostanze che assorbono, sono molto sensibili ai prodotti tossici e sono degli ottimi indicatori per il monitoraggio degli inquinanti.

Interessante potrebbe essere la possibilità di valutare l'inquinamento da anidride solforosa e da metalli pesanti, in prossimità dei siti industriali, mediante i licheni. E' stato inoltre dimostrato che i licheni non soltanto manifestano grande sensibilità ad un certo tipo di inquinante, ma sono anche in grado di opporsi agli effetti dei metalli pesanti per la capacità di stabilire legami con essi al di fuori delle loro cellule.

Il lichene è un organismo fotosintetico dipendente soltanto dalla luce, dall'aria e dagli elementi minerali. Il fungo associato riceve carbonio organico dall'alga o dal cianobatterio, com'è stato dimostrato mediante l'uso d'anidride carbonica marcata con ^{14}C . Nei licheni, con il cianobatterio del genere *Nostoc*, interessante è la fissazione dell'azoto da parte dell'organismo autotrofo ed il suo trasferimento al fungo. L'associazione con il fungo modifica profondamente il metabolismo del partner fotosintetico, tanto che le alghe verdi producono grosse quantità di due alcoli, il D-sorbitolo ed il D-ribitolo che, al contrario, non sintetizzano quando sono libere dall'associazione. Le ife formano un fitto reticolo intorno alle cellule dell'alga e penetrano spesso all'interno di queste. Ciò avviene mediante gli austori o gli appressori (estroflessioni specializzate tipiche dei funghi parassiti) che consentono la contrazione del rapporto nutrizionale del micete con l'alga.

La separazione dei due simbionti e la loro coltivazione separata in coltura pura è causa di completo stravolgimento della morfologia del lichene. Il fungo cresce in colonie compatte, di forma completamente diversa dal lichene ed ha bisogno di un gran numero di carboidrati complessi. Al contrario, le alghe o i cianobatteri isolati crescono molto più velocemente di quanto si trovano nei licheni. Questo fatto e la presenza d'austori od appressori, nel rapporto del fungo con l'alga, fanno legittimamente pensare che più di un

mutualismo si tratta di un parassitismo controllato dell'alga o della cianoficea da parte del fungo.

Il lichene, tuttavia, è qualcosa di più che la semplice somma dei suoi componenti ed, in questo senso, è un organismo ben distinto e quando il fungo viene rimesso in presenza del simbionte fotosintetico dapprima riporta il partner sotto controllo e poi stabilisce con esso la struttura tipica dell'associazione lichenica.

Virus

I virus sono una popolazione d'individui per lo più identici per forma, dimensioni, struttura e composizione chimica i cui singoli elementi, le particelle virali o *virioni*, rappresentano, di norma, l'unità infettiva, vale a dire l'unità che si mantiene a spese delle cellule d'organismi viventi procarioti od eucarioti.

Componenti comuni a tutti i virus sono gli acidi nucleici, le proteine e l'acqua. Quest'ultima è la parte più cospicua della particella virale di cui costituisce dal 10 al 50% in peso.

Gli acidi nucleici costituiscono il genoma dei virus, vale a dire la parte infettiva. Gli acidi nucleici possiedono ad un estremo una molecola di zucchero pentosio (ribosio o desossiribosio), con un gruppo ossidrilico potenzialmente libero sull'atomo di carbonio in posizione 5 (terminazione 5') ed un'altra molecola di pentosio all'altro estremo, sempre con un gruppo ossidrilico potenzialmente libero sull'atomo di carbonio in posizione 3 (terminazione 3'). Le terminazioni 3' e 5' costituiscono le estremità iniziali e terminali delle molecole genomiche, sulle quali sono spesso inseriti particolari gruppi che completano e stabilizzano la struttura. Tali gruppi sono costituiti da una proteina genomica (VPg), da una cuffia metil-guanosinica (con funzioni protettive nei confronti dell'acido nucleico dall'azione degradante delle nucleasi ed agevolante l'ingresso di RNA messaggero nel complesso ribosomiale), da una sequenza poliadenilica (PolyA, importante nel determinare il potere infettivo e nello svolgere funzioni regolatrici o di riconoscimento nei processi replicativi), da una struttura tRNA-simile.

Gli acidi nucleici dei virus sono due, l'uno costituito da una o più molecole lineari o circolari di acido ribonucleico (RNA) e l'altro da molecole, anch'esse lineari o circolari, di acido desossiribonucleico (DNA). Soltanto uno dei due acidi nucleici è presente in ciascun virus.

Il genoma virale può essere costituito da una singola (ss) o doppia (ds) elica di acido nucleico.

Convenzionalmente gli acidi nucleici sono considerati di senso positivo (+) se costituiti da molecole infettive che possono immediatamente replicarsi, perché in grado di interagire subito con i sistemi sintetizzanti della cellula ospite, oppure di senso negativo (-) se formati da molecole complementari non direttamente infettive che, per potersi esprimere nelle cellule dell'ospite, devono essere prima trascritte in molecole di senso positivo (+).

Ogni virus è in grado di produrre nella cellula infettata delle proteine specifiche, che determinano precisi effetti sull'ospite, il cui numero è in rapporto alle dimensioni del genoma. La codifica di una specifica proteina avviene per mezzo di *griglie di lettura* chiamate ORF (acronimo di *open reading frames* degli anglosassoni) le quali sono situate fra le terminazioni 5' e 3'. I genomi composti di una sola ORF sono detti *monocistronici*, di due ORF sono chiamati *bicistronici*, di più ORF sono denominati *policistronici*. Il

genoma del virus si dice *monopartito* quando tutte le ORF sono contenute in una sola molecola di acido nucleico ed è detto *bipartito* o *tripartito* se le ORF sono suddivise tra due o tre diverse molecole di acido nucleico.

Nei virus con genoma frazionato, affinché l'infezione possa partire è indispensabile la contemporanea presenza, all'interno della cellula ospite, di tutti i frammenti in cui esso è suddiviso.

Le proteine rappresentano l'altro principale componente delle particelle virali. Esse costituiscono il 50-95% del peso del virione e svolgono funzioni differenziate. Alcune, dette strutturali, formano l'involucro esterno, o *capside*, delle particelle virali. Fra queste si ricorda la proteina capsidica indicata con la sigla CP (*coat protein*). Altre proteine, note come non strutturali, svolgono importanti funzioni nella replicazione. Fra queste si ricordano le polimerasi o replicasi virali (POL) e le elicasi (HEL), importanti nella scissione proteolitica dei polipeptidi, i vari tipi di proteasi (PRO), che agevolano la diffusione dei virus all'interno dell'ospite, le proteine di movimento (MP), che inducono la trasmissibilità virale da parte dei vettori, i fattori coadiutori o di supporto di cui si accennerà (HF, acronimo di *helper factor*).

Altri possibili componenti dei virus sono i lipidi che possono essere presenti dal 4% al 15-25%, fino ad un massimo del 37%. Essi vanno a costituire un involucro lipoproteico o sono parte integrante del capsid. Alcuni batteriofagi contengono fino al 5-9% di fosfolipidi.

I glucidi da soli o coniugati alle proteine (glucosio, mannosio, xilosio, galattosammina, glucosammina) sono altri normali componenti (3-9%) dei virus provvisti di capsid, come pure alcune poliammine (circa 1% in peso della particella virale) ed, infine, alcuni ioni metallici quali Ca^{2+} e Mg^{2+} , associati al capsid.

Un'altra caratteristica è il cosiddetto *satellitismo*, per il quale il virus dà luogo ad altri componenti detti *satelliti*. Questi sono diversificati per dimensioni, peso e densità, tendono a separarsi in classi con differente comportamento idrodinamico e sono caratterizzati dai seguenti aspetti:

- 1) il loro materiale genetico è una molecola di RNA, a singola elica, di piccole dimensioni, non facente parte del genoma del virus di supporto;
- 2) la replicazione del loro RNA dipende dallo specifico virus coadiutore o di supporto (virus *helper* degli anglosassoni);
- 3) interferiscono con l'espressione sintomatologica delle malattie indotte dal virus di supporto;
- 4) si replicano nel citoplasma della cellula ospite utilizzando come stampo il loro stesso RNA.

Esempi di satelliti sono quelli che hanno come coadiutore il virus della necrosi del tabacco (TNV), il virus della maculatura anulare del tabacco (TRSV), il virus della maculatura gialla della cicoria (CYMV), il virus del mosaico del cetriolo (CMV) noto con l'acronimo CARNA 5 (*cucumber mosaic virus associated RNA 5*). Questi satelliti interferiscono con la replicazione degli RNA genomici e svolgono funzioni regolatrici dell'infezione, modulandola e spesso attenuandola.

Le dimensioni delle particelle virali sono molto differenziate, potendo assumere valori che vanno da 17 nm di diametro (come il satellite di TNV), osservabili solo al microscopio elettronico, fino a dimensioni di 450 x 260 nm, come i *Poxvirus*, osservabili, sia pure con difficoltà, al microscopio ottico.

Tra questi estremi esistono tutti gli altri virus noti. Le forme predominanti sono quelle isodiametriche nei virus degli animali, isodiametriche o filamentose (flessuose,

sottili e lunghe) nei virus batterici o con testa poligonale e coda rigida o contrattile nei classici batteriofagi, isodiametrici ed anisodiametrici ugualmente rappresentati nei fitovirus (particelle icosaedriche, isodiametriche, bastoncelliformi rigide, flessuose, pleomorfe da ellissoidali a bacilliformi, sferiche).

I virus hanno una grande specificità nei confronti degli ospiti ed il suolo può contenerne un'infinita quantità.

In relazione al tipo di ospite, i virus possono interessare i batteri (batteriofagi), gli attinomiceti (attinofagi), alcuni funghi (micofagi), come quelli del genere *Penicillium* (*P. chrysogenum* e *P. stoloniferum*), le alghe Cianoficee (cianofagi), le piante superiori (fitovirus), gli animali e l'uomo.

I virus possono conservarsi più o meno a lungo nel terreno, sia per la presenza di resti vegetali infetti e di tessuti di molti organismi vettori (insetti, nematodi, funghi), sia perché essi possono essere adsorbiti sui colloidi organici e minerali.

In base ad affinità epidemiologiche si distinguono virus trasmessi attraverso il terreno, ad esempio da funghi e nematodi (*soil-borne*) e virus trasmessi per mezzo dell'aria da insetti ed acari eriofidi (*air-borne*).

I vettori dei virus, trasmessi attraverso il terreno, sono capaci di spostamenti autonomi limitati e, pertanto, agiscono entro un raggio di pochi metri attorno alle sorgenti d'infezione.

I batteriofagi o semplicemente fagi sono virus che possono avere una certa importanza nel terreno, perché infettano specie di batteri che in esse vivono. Essi sono di dimensioni comprese tra i 20 nm fino a 500 nm ed oltre, possono essere caudati ed essere a RNA oppure a DNA.

Si conoscono una decina di famiglie di batteriofagi che infettano, fra l'altro, i batteri del terreno e fra questi gli azotofissatori o quelli che partecipano al ciclo dell'azoto. In particolare, *Azotobacter*, *Rhizobium*, *Aërobacter*, *Agrobacterium*, *Pseudomonas* sono attaccati da fagi, specialmente nei terreni ricchi, dove i ceppi fagoresistenti sono molto rari. Le famiglie di batteriofagi più interessanti sono i *Myoviridae*, *Styloviridae*, *Podoviridae*, *Tectiviridae*, *Inoviridae*. I batteriofagi appartenenti a queste famiglie sono parassiti di batteri con *habitat* terricolo e la loro presenza può influenzare la fertilità del suolo. Approfondimenti sperimentali in questa direzione sarebbero da auspicare.

La realizzazione dell'infezione avviene perché i fagi sono provvisti di una specie di solco con il quale si fissano alla superficie della cellula ospite e trasferiscono l'acido nucleico all'interno della stessa, dove possono così moltiplicarsi.

Il processo infettivo dura da pochi minuti a poche ore e porta alla lisi delle cellule infette, per distruzione della membrana e conseguente liberazione nel mezzo di numerose particelle fagiche (100-200 batteriofagi per cellula batterica lisata).

Se il processo infettivo si fa avvenire *in vitro*, mediante infezione artificiale di una colonia batterica, si possono osservare zone litiche, a margine netti ed a placche, in rapporto alla massa d'inoculo delle particelle fagiche.

Numerosi sono i virus che si trovano nel terreno, dove possono infettare organismi viventi vegetali ed animali. Questi possono ammalarsi o fungere semplicemente da vettori dei virus per la trasmissione ad altri organismi. Le piante coltivate possono ricevere un danno più o meno grave per la comparsa di una sintomatologia patologica e dar luogo ad una conseguente riduzione considerevole della resa produttiva.

Come già accennato, i virus del terreno possono infettare attinomiceti, funghi microscopici, cianoficee, specie costituenti la pedofauna ed altri organismi naturali

viventi nel terreno.

Tuttavia, è raro che i virus possano costituire un problema nelle comunità naturali. Queste rappresentano un sistema ecologico in equilibrio che nel tempo tende ad eliminare i casi estremi, fonte di perturbazione, come i ceppi virali molto aggressivi e gli organismi molto suscettibili.

Se però l'equilibrio è alterato, anche soltanto dall'introduzione artificiale di nuove specie o varietà, i rapporti ecologici si modificano e le malattie virali possono divenire dominanti, con differenti gradi d'intensità e frequenza, in funzione dell'importanza delle modificazioni intervenute.

Specificamente, le coltivazioni specializzate (la monocoltura in particolare) rappresentano un intervento antropico piuttosto innaturale perché costituite da individui coetanei, geneticamente molto simili o addirittura identici, incapaci di opporsi con successo all'invasione di un qualunque parassita.

Con riferimento alle specie vegetali ed animali, microscopiche e macroscopiche, viventi nel terreno, ancora molto poco si conosce circa i rapporti simbiotici, mutualistici o antagonisti, che possono instaurarsi con i virus.

Più ampie sono invece le conoscenze sui vettori tellurici di virus delle piante coltivate, come funghi e nematodi. Per esempio, il fungo fitopatogeno della classe *Archimycetes*, la specie *Olpidium radicale*, vivente in terreni umidi, può trasmettere alcune malattie virali delle piante coltivate quali la necrosi del cetriolo (CNV), la maculatura fogliare del cetriolo (CLSV), la maculatura necrotica del melone (MNSV) ed il virus del cetriolo (CSBV), trasmesso attraverso il terreno.

Molti nematodi viventi nel suolo possono trasmettere malattie virali alle piante sane dopo aver acquisito i virus dalle piante ammalate. E' il caso dei nematodi longidoridi del genere *Xiphinema*, *Longidorus* e *Paralongidorus*, dei nematodi trichodoridi del genere *Trichodorus* e *Paratrachodorus*.

Anche alcuni insetti che vivono nel terreno, come molti Coleotteri Curculionidi, possono trasmettere entità virali alle piante. A tal proposito si ricorda il virus del giallume della rapa (TYV).

Se in molti casi è necessaria la presenza di un vettore a *habitat* terricolo per la trasmissione di malattie virali delle piante coltivate, in molti altri non è necessaria la presenza dell'ospite intermedio e la trasmissione può avvenire direttamente attraverso il terreno.

Infatti, molti virus, come ad esempio quelli di un intero raggruppamento, la famiglia dei *Tombusviridae*, si trasmettono alle piante coltivate in maniera abiotica, neppure per contatto tra le parti aeree, ma soltanto attraverso il terreno.

Altrettanto, il virus X della patata non possiede propri vettori biotici e la sua trasmissione avviene per contatto tra le piante infette e sane, attraverso il terreno dove i virus arrivano sia con i residui vegetativi, sia con le acque di irrigazione.

Le principali famiglie e generi di virus, che interessano i vegetali e gli animali, sono riportati nella tabella 46. In essa sono evidenziati in grassetto i gruppi di virus che hanno origine dal terreno, direttamente o indirettamente, attraverso i residui o le spoglie di organismi o perché trasmessi dai vettori viventi nel suolo.

Tutte le famiglie ed i generi di virus riportati sono a RNA, ad eccezione della famiglia *Geminiviridae* che comprende virus ssDNA e dei generi *Badnavirus* e *Caulimovirus* che sono dsDNA. Dei virus riportati a RNA tutti sono a ssRNA, tranne i virus delle famiglie *Partitiviridae* e *Reoviridae* che sono a dsRNA.

Tab. 46 – Principali famiglie e generi di virus. Evidenziati in grassetto sono quelli maggiormente presenti nel terreno o in organismi vettori ad *habitat* terricolo.

Virus che infettano piante e vertebrati o invertebrati	Virus che infettano piante o funghi	Virus che infettano solo piante Generi non raggruppati	
Famiglia <i>Rhabdoviridae</i>	Famiglia <i>Partitiviridae</i>	Famiglia <i>Geminiviridae</i>	<i>Badnavirus</i>
Genere <i>Cytorahbdovirus</i>	Genere <i>Alfacryptovirus</i>	Sottogruppo I	<i>Caulimovirus</i>
Genere <i>Nucleorhabdovirus</i>	Genere <i>Betacryptovirus</i>	Sottogruppo II	<i>Necrovirus</i>
Famiglia <i>Bunyaviridae</i>		Sottogruppo III	<i>Machlomovirus</i>
Genere <i>Tospovirus</i>		Famiglia <i>Sesquiviridae</i>	<i>Luteovirus</i>
Genere <i>Tenuivirus</i>		Genere <i>Sesquivirus</i>	Tipo A
Famiglia <i>Reoviridae</i>		Genere <i>Waikavirus</i>	Tipo B
Genere <i>Phytoreovirus</i>		Famiglia <i>Bromoviridae</i>	<i>Sobemovirus</i>
Genere <i>Fijvirus</i>		Genere <i>Bromovirus</i>	<i>Tymovirus</i>
Genere <i>Oryzavirus</i>		Genere <i>Cucumovirus</i>	<i>Marafivirus</i>
		Genere <i>Ilarvirusvirus</i>	<i>Dianthovirus</i>
		Genere <i>Alfamovirus</i>	<i>Enamovirus</i>
		Famiglia <i>Tombusviridae</i>	<i>Idaeovirus</i>
		Genere <i>Tombusvirus</i>	<i>Tobamovirus</i>
		Genere <i>Carmovirus</i>	<i>Furovirus</i>
		Famiglia <i>Comoviridae</i>	<i>Tobravirus</i>
		Genere <i>Comovirus</i>	<i>Hordeivirus</i>
		Genere <i>Nepovirus</i>	<i>Carlavirus</i>
		Genere <i>Fabavirus</i>	<i>Potexvirus</i>
		Famiglia <i>Potyviridae</i>	<i>Closterovirus</i>
		Genere <i>Potyvirus</i>	<i>Capillovirus</i>
		Genere <i>Bymovirus</i>	<i>Trichovirus</i>
		Genere <i>Rymovirus</i>	<i>Tenuivirus</i>
			<i>Umbravirus</i>

Dall'osservazione della tabella 46 emerge che la maggior parte dei virus della famiglia *Tombusviridae* si trasmettono alle piante coltivate attraverso il terreno, da cui vengono acquisiti per mezzo delle radici e senza alcun intervento di vettori. In particolare, il virus del rachitismo cespuglioso del pomodoro (TBSV), del genere *Tombusvirus* (figura 50) ed il virus della maculatura del garofano (CarMV), del genere *Carmovirus* hanno un *habitat* rappresentato dal terreno ed ambienti acquatici, in climi

temperati e subtropicali. Alcuni generi di virus della famiglia *Comoviridae* si trovano in gruppi animali viventi nel terreno e da essi vengono attivamente trasmessi, in relazione al genere. Il genere *Comovirus*, specificatamente, è trasmesso persistentemente da Coleotteri Crisomelidi, il genere *Nepovirus* è trasmesso da nematodi fitopatogeni del terreno della famiglia Longidoridi.

Oltre ai virus bisogna ricordare ancora alcuni patogeni molecolari che, come i virus, sembrano essersi originati dal genoma dei batteri ed eucarioti. Particolarmente importanti tra questi sono i viroidi che sono, però, abbastanza diversi dai virus. I viroidi sono i più piccoli agenti di malattie infettive che si conoscano, sono privi di rivestimenti proteici ed hanno dimensioni molto inferiori di quelle dei più piccoli genomi virali. Essi sono, in pratica, piccole molecole di RNA a filamento singolo che si replicano autonomamente nelle cellule sensibili.

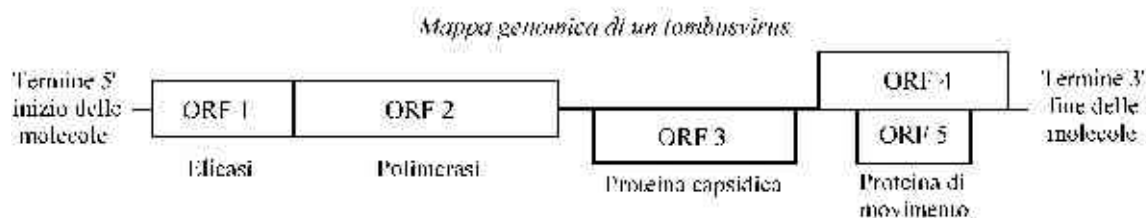
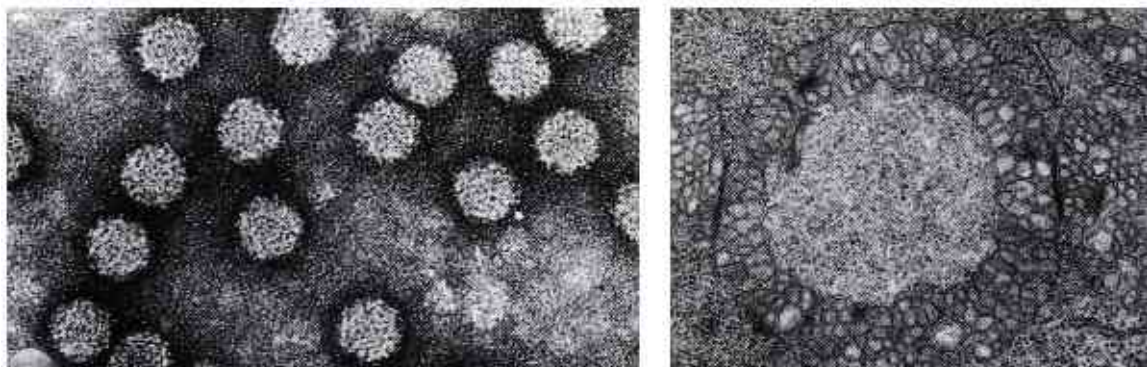


Fig. 50 – Particelle isodiametriche (30 nm di diametro) di un *Tombusvirus* in un estratto di pianta (in alto a sinistra). Corpo d'inclusione multivescicolato in struttura citopatologica, sito di replicazione di RNA virale (in alto a destra). Mappa genomica, con griglie di lettura proporzionate al loro peso (ORF 1 è 33 K) e dove sono indicati i rispettivi prodotti. (da Conti, 1996).

Si conoscono solo viroidi che attaccano le piante ed il primo segnalato fu il viroide del tubero di patata a fuso (PSTV), che si manifesta con allungamenti, nodosità e spaccature profonde degli organi ipogei della Solanacea. Circa la loro origine, i virus non possono essersi originati contemporaneamente alle prime cellule per processi d'autoreplicazione, perché essi esistono solo grazie alla loro capacità di utilizzare i meccanismi cellulari. Ne deriva che i virus debbono aver avuto origine dopo l'evoluzione dei sistemi cellulari, dove il codice genetico era stato già perfezionato. I virus sono sostanzialmente simili ai cromosomi batterici e plasmidi od a molecole di RNA messaggero, avvolti da un rivestimento proteico. Un possibile meccanismo per l'origine dei virus è suggerito dal fenomeno della trasformazione, un tipo di ricombinazione genetica dei batteri per il quale frammenti di DNA possono essere liberati e passare in

altre cellule. Secondo ciò, frammenti di DNA e di RNA possono penetrare nelle cellule ed influenzare i processi genetici della cellula ospite. Se riescono a moltiplicarsi ed a diffondersi da una cellula all'altra, essi possono persistere e se generano un rivestimento proteico protettivo diventano dei virus. E' possibile che i virus più grandi e complessi, i poxvirus, si siano evoluti da batteri degenerati. I virus hanno probabilmente avuto origine più volte, indipendentemente, negli ultimi tre miliardi d'anni. Ci sono prove che dimostrano chiaramente che virus del tutto stabili possono evolversi con sorprendente rapidità in risposta alle forti pressioni selettive ed è molto probabile che nuovi tipi di virus si stiano tuttora evolvendo, sia da batteri, sia da eucarioti. In definitiva, i patogeni molecolari, in qualunque modo presenti nel terreno, possono essere dannosi a tutti gli organismi viventi nel suolo e soprattutto alle piante coltivate alle quali sono in grado di arrecare gravi danni. Essi possono rimanere nel terreno in una fase quiescente, possono sopravvivere, diffondersi attraverso l'acqua e manifestare improvvisamente il potere patogenico non solo nei confronti delle piante ma anche verso i microrganismi utili del suolo. Si auspica che interessanti settori di ricerca nel campo dei virus del terreno siano indagati. In particolare, quelli relativi allo studio dei fagi di specie batteriche implicate in alcuni fondamentali ed importanti processi biochimici del terreno, fra i quali meriterebbe particolare attenzione la nitrificazione.

Riconoscimento e carica dei microrganismi del suolo

E' noto che in un solo grammo di terreno normale, agricolo, fertile vivono miliardi di microrganismi. Specificamente, si possono trovare 2,5 miliardi di batteri, 40.000 microfunghi, 50.000 alghe e 30.000 protozoi e molti altri raggruppamenti sistematici microscopici appartenenti al mondo animale e vegetale. Le procedure che di solito sono seguite per il conteggio di un numero così alto di individui di una popolazione saranno oggetto della trattazione di questo capitolo. Si attua la conta su piastra Petri di batteri, funghi microscopici ed actinomiceti viventi e la misura diretta della popolazione microbica vivente. La prima procedura consiste nell'inoculare, su un apposito substrato, una sospensione nota di terreno in acqua sterile, molto diluita. Ogni individuo della sospensione darà luogo ad una colonia ed il numero di colonie che si forma, valutabile ad occhio nudo, corrisponde al numero degli individui della sospensione di terreno. Naturalmente bisognerà usare substrati nutritivi differenti, su ognuno dei quali cresce una frazione fisiologicamente definita della microflora, con un certo grado di specificità. Ogni substrato deve essere caratterizzato da una particolare composizione chimica, concentrazione dei differenti componenti e rapporto quantitativo tra questi, pH, potenziale di ossidoriduzione, specificità di sostanze stimolanti, attivanti, inibenti (vitamine, aminoacidi, antibiotici). E', inoltre, necessaria un'adeguata standardizzazione della metodica, poiché essa è influenzata dalla preparazione del campione di terreno, dal rapporto di diluizione, dall'omogeneità della sospensione, dalle condizioni di incubazione, dalla raccolta ed interpretazione dei dati. La conta diretta della microflora del terreno è molto importante per evidenziare l'equilibrio microbiologico del suolo e gli effetti degli interventi antropici (lavorazioni, concimazioni, azione della specie coltivata, diserbo, trattamenti antiparassitari) e per determinare l'attitudine del suolo a sostenere la coltivazione di una specie o di una varietà, anziché di un'altra (ad esempio l'impiego di una specie non suscettibile o di una varietà resistente all'attacco di un certo microrganismo patogeno, individuato con una elevata massa d'inoculo all'esame delle colonie in piastra). Il cosiddetto *piastramento* dei microrganismi del terreno comporta l'impiego di almeno tre differenti substrati di crescita, adatti, rispettivamente, per i

batteri, per i funghi microscopici e per gli actinomiceti. Naturalmente alcuni microrganismi specifici non trovano le condizioni adatte di crescita su questi tre mezzi di coltura e, pertanto, sfugge alla determinazione che risulta approssimata per difetto.

La misura della biomassa microbica vivente nel terreno può essere fatta direttamente, contando al microscopio le cellule contenute in aree di dimensioni note di un vetrino portaoggetti provvisto di reticolo, oppure utilizzando il pedoscopio, vale a dire un capillare a sezione quadrangolare nota, che è inserito nel terreno ed osservato direttamente al microscopio, oppure impiegando coloranti vitali e sostanze trasmissibili alla progenie, in grado di evidenziare le cellule dei microrganismi viventi. La valutazione quantitativa del complesso di microrganismi può essere effettuata anche indirettamente, mediante determinazione della quantità di substrato nutritivo utilizzato dai microrganismi, di ossigeno consumato e di anidride carbonica prodotta, di prodotti catabolici sintetizzati. L'incorporazione nelle molecole del substrato di isotopi marcanti consente, per via radiografica, la valutazione della biomassa di microrganismi specifici.

Una normale analisi microbiologica mostra la presenza di batteri, funghi ed actinomiceti, in un rapporto nel quale prevalgono i batteri, dove i microfunghi sono molto meno abbondanti e gli actinomiceti sono meglio rappresentati nei terreni provvisti di una buona struttura, ricchi in materia organica e caratterizzati da un andamento ottimale del processo di umificazione. D'altra parte bisogna considerare che il peso medio, in sostanza secca, di una cellula batterica, ottenuto supponendo il suo peso specifico all'incirca uguale a 1 (quello dell'acqua distillata a 4 °C) e misurando il suo volume uguale a 1 mm³, è circa uguale a 10-12 g, di gran lunga inferiore al peso della cellula di un actinomicete o di un microfungo. Nello strato superficiale attivo di un terreno si valuta un peso medio di cellule batteriche intorno a 2.500-3.000 kg per ettaro ed un analogo peso di cellule actinomicetiche, anche se, come già detto, da un punto di vista numerico, queste ultime sono meno rappresentate dei batteri, ma di maggior singolo peso. Lo stesso concetto è applicabile anche per i funghi microscopici. Essi sono numericamente meno rappresentati dei batteri e degli actinomiceti, ma la loro biomassa è invece superiore perché il peso medio di una cellula fungina è diverse centinaia o anche migliaia di volte più elevato di quello di una cellula batterica. Tuttavia, si possono avere notevoli oscillazioni dei valori ora riportati, con degli estremi che vanno, nei nostri ambienti pedoclimatici, da 300 fino a 20.000 kg di biomassa microbica per ettaro, corrispondenti, rispettivamente, a circa la decimillesima e la centesima parte del peso totale del terreno. Sono questi rapporti molto bassi e se si considera il fatto che i microrganismi del terreno tendono a aderire alla superficie delle particelle terrose e si calcola la superficie da essi occupata in un grammo di terreno, si deduce che tale superficie è una frazione piccolissima di quella sviluppata da un grammo di un suolo ordinario messo a coltura. Infatti, analizzando un grammo di terreno si rileva che in esso sono presenti diversi miliardi di batteri, ma se si riferisce il volume dei microrganismi alla superficie che essi hanno a disposizione in quel volume di terreno, si può vedere che in quel grammo di terreno, pari ad una superficie di 100 m², sono presenti 10 miliardi di batteri e che ogni batterio, di 1 μm³ di volume, ha a disposizione un'area di 1 mm², corrispondente ad una densità di popolazione molto bassa. L'elevatissimo numero di batteri che si possono contare in un grammo di terreno, pertanto, corrispondono, nella realtà, ad una densità di popolazione (cioè il numero d'individui riferito ad una superficie unitaria) per nulla elevata e corrispondente a quella di tutti gli altri esseri viventi in generale, la cui sopravvivenza è legata ad ordinarie limitazioni del cibo, dello spazio, delle risorse ed alla normale competizione tra gli organismi i quali hanno il compito di mantenere, in equilibrio tra loro, risorse e popolazione.

Tutto ciò assume una notevole importanza da un punto di vista agronomico, perché le dinamiche di fluttuazione delle popolazioni dei microrganismi, le interazioni interne ed il loro avvicendamento, che interessa biomasse dell'ordine di tonnellate per ettaro, rendono possibile la realizzazione dei cicli biogeochimici degli elementi, la bioconversione dei residui della vegetazione e della materia organica, la giusta ripartizione tra l'umificazione e la mineralizzazione del carbonio, dell'azoto, dei fosfati, dei composti solforati e d'altri, lo sviluppo di numerose popolazioni microbiche appartenenti al gruppo dei cellulolitici, proteolitici, lipolitici, azotofissatori, nitrificanti e denitrificanti, fermentanti, acido-produttori, pectinolitici, chitinolitici.

Sempre a proposito delle fluttuazioni del numero di individui in una popolazione microbiologica, va fatto ancora osservare che nel terreno molto di frequente si verificano condizioni nutrizionali di grande carenza, tanto che si parla di condizioni di fame (*starvation*), a seguito delle quali si determinano grandi specializzazioni delle funzioni ed una notevole diversificazione delle catene alimentari. Queste condizioni di carenza alimentare ingenerano una gran competizione tra le diverse specie viventi nel suolo, con la conseguenza che la proliferazione e la dilatazione di una popolazione e poi la successiva contrazione numerica della stessa, per fenomeni di decadenza, sono particolarmente esasperate ed ingigantite nel terreno rispetto ad ambienti diversi.

Un gruppo d'agenti microrganici presenti nel terreno, come si è già visto, è rappresentato dai virus. Questi possono essere individuati e misurati nella loro massa di inoculo mediante diverse metodologie. I virus possono essere presenti nel terreno, adsorbiti alle particelle colloidali o nei residui vegetali o nelle spoglie di organismi animali, in uno stato di quiescenza. Si ricorda, a tal proposito, che i virus, per moltiplicarsi ed aumentare numericamente, hanno bisogno di cellule vive e possono diventare attivi in presenza di un ospite o di un loro vettore, come, per esempio, i batteri, i funghi, i nematodi, gli insetti. La determinazione dei virus del terreno, così come indicato, può essere effettuata mediante saggi biologici oppure ricorrendo alla sierologia ed a tecniche molecolari come l'ibridazione molecolare e l'amplificazione genica.



Fig. 51 – Riconoscimento di agenti virali fitopatogeni mediante saggi biologici con piante indicatrici. Lesioni indotte su *Chenopodium amaranticolor*, su *Vigna unguiculata* e su *Chenopodium album* da TNV (virus della necrosi del tabacco), CMV (virus del mosaico del cetriolo) e da CoMV (virus del mosaico della vigna), rispettivamente.

I saggi biologici consistono nell'utilizzare degli indicatori erbacei ed hanno, come fondamento, l'assunto che una delle caratteristiche dei virus è quella di essere trasmissibili ed una buona parte di essi può essere trasmessa meccanicamente alle piante da saggio. Le foglie con sintomi di alcune di queste piante indicatrici sono in figura 51.

Per la maggior parte dei virus delle piante ortive viene indicata una serie più o meno standard idonea per il loro isolamento: *Chenopodiaceae* (*Chenopodium quinoa*, *C. amaranticolor*), *Cucurbitaceae* (*Cucumis sativus*, *Cucurbita pepo*), *Leguminosae* (*Phaseolus vulgaris*, *P. aureus*, *Vigna unguiculata*, *Vicia faba*, *Pisum sativum*), *Solanaceae* (*Nicotiana tabacum*, *N. benthamiana*, *N. occidentalis*, *N. glutinosa*, *N. clevelandii*, *N. megalosiphon*, *Datura stramonium*, *Petunia hybrida*), *Amaranthaceae* (*Gomphrena globosa*, *Celosia cristata*), *Compositae* (*Zinnia elegans*) *Labiatae* (*Ocimum basilicum*). I sintomi che si possono rilevare sugli indicatori possono essere locali, se appaiono solo sugli organi oggetto di inoculazione meccanica, e sistemici, se compaiono su parti di pianta non inoculate, segno di una diffusione a tutta la pianta. Le lesioni locali possono essere clorotiche e necrotiche ed avere dimensioni che vanno da quelle di una capocchia di spillo fino a qualche millimetro. I sintomi sistemici sono mosaico, decolorazioni, necrosi, maculature, distorsioni, riduzioni del lembo fogliare e nanismo.

La sierologia è una delle metodiche fondamentali nella diagnosi dei virus delle piante, sia per i molteplici campi d'impiego, sia per gli elevati gradi di sensibilità ed affidabilità cui è giunta. La capacità degli anticorpi, prodotti dal sistema immunitario di animali a sangue caldo, di reagire, specificamente *in vitro*, contro antigeni che ne hanno stimolato la formazione è alla base della diagnosi sierologica. L'antigene è rappresentato, nel caso specifico, dal virus oggetto di diagnosi, ma può anche essere costituito da batteri ed altri microrganismi per i quali questo tipo di metodica può essere pienamente applicabile per lo specifico riconoscimento. Un antigene, normalmente una proteina, introdotto in un organismo animale è in grado di indurre una risposta immunologica, ossia la formazione di anticorpi. Gli anticorpi (immunoglobuline IgG) sono prodotti dal sistema immunitario dell'organismo animale e sono capaci di riconoscere l'antigene per la presenza di siti antigenici che ne assicurano la specificità. Per la comprensione si usa affermare che una chiave sta alla propria serratura, come l'anticorpo sta al suo antigene. Bastano meno di 10 amminoacidi per costituire un sito antigenico, il cui riconoscimento specifico è assicurato da una porzione dell'anticorpo prodotta da particolari cellule animali denominate linfociti B. Durante la risposta immunitaria sono prodotti tanti anticorpi quanti sono i siti antigenici della molecola estranea introdotta nell'animale. Gli anticorpi seguono il circolo sanguigno dell'animale e possono essere recuperati nella frazione non coagulata del sangue (siero). Alcuni virus, tuttavia, possono presentare una variabilità nella struttura del capsido ed una certa instabilità a tale livello, con la conseguenza che per essi questo tipo di metodica possa costituire una limitazione. In linea generale però, va chiarito che le particelle virali, essendo delle nucleoproteine, sono buoni immunogeni. Per la preparazione di un antisiero, l'animale (un coniglio oppure un topo) deve essere immunizzato con preparati di particelle virali altamente purificati, vale a dire separati dalla sorgente d'infezione mediante adeguate procedure, perché la presenza di contaminanti immunogeni può indurre un'indistinta produzione di anticorpi sia contro le particelle virali, sia contro i contaminanti, con il risultato che, quando impiegato su estratti di succo grezzo, il siero potrà reagire anche in assenza di virus.

I sieri con anticorpi formati contro siti antigenici diversi sono detti *policlonali* e, poiché non esiste possibilità di separare le varie immunoglobuline, la loro maggiore limitazione sta nella scarsa abilità a discriminare ceppi virali molto simili tra loro. Pertanto, per analisi molto fini è necessario separare tutte le IgG prodotte da una stessa linea (clone) di linfociti B ed è possibile, teoricamente, ottenere tanti antisieri quante

sono le linee IgG. Purtroppo, non è possibile separare fisicamente le diverse IgG se non intervenendo a priori, a livello dei linfociti B, estratti dall'animale immunizzato con un particolare virus e fusi con cellule di mieloma in grado di moltiplicarsi all'infinito. Da tale fusione si ottengono molti prodotti (denominati *ibridomi*), ma soltanto quelli che producono linee di anticorpi in grado di riconoscere determinanti antigenici diversi fra loro saranno scelti. I sieri preparati in questo modo, contenendo un unico sito antigenico, sono detti *monoclonali*. Va anche detto che molte ditte commercializzano sieri specifici per la diagnosi di ogni tipo di virus e di molti altri microrganismi. E' quindi possibile l'acquisto di uno specifico *kit* che consente una specifica identificazione in un determinato campione.

La rivelazione della reazione antigene-anticorpo può essere rivelata osservando la formazione di un precipitato, direttamente al microscopio elettronico, mediante una reazione enzimatica. Il primo metodo, l'osservazione del precipitato, può essere realizzato in piastra di gel d'agar (immunodiffusione radiale) o in soluzione (microprecipitazione in tubo o su vetrino). In entrambi i casi, il riconoscimento di un antigene, in presenza di specifici anticorpi, avviene a seguito della comparsa di un precipitato bianco, che appare come una banda opalescente (baffo) in agar e come un lieve flocculato in tubo da saggio o su vetrino. Queste reazioni, di facile applicazione, sono, tuttavia, poco sensibili perché richiedono un'elevata concentrazione di virus per ottenere la certezza della positività o negatività della reazione.



Fig. 52 – Particelle del virus Y della patata (PVY), in un estratto di piante infette di peperone, dopo decorazione con anticorpi specifici (da Fiume *et al.*, 1993).

L'osservazione diretta al microscopio elettronico, conosciuta anche come tecnica ISEM (*immunosorbent electron microscopy*), fornisce maggiori possibilità di successo della metodica precedente e consiste nel depositare su una griglia da microscopia

elettronica, sensibilizzata con un antisiero diluito 1:500-1:1.000, una goccia di succo grezzo (senza additivi) estratto da materiale supposto sorgente di infezione. Gli anticorpi adsorbiti alla griglia catturano specificamente le particelle virali, impediscono l'assorbimento del restante materiale del campione da esaminare presente nel succo grezzo e consentono la concentrazione delle sole particelle virali sensibili all'anticorpo, anche se originariamente poco concentrate.

E' possibile rendere più sicura la diagnosi mediante successive *decorazioni* delle particelle virali, ossia deponendo sulla griglia una goccia d'antisiero poli e monoclonale, poi lavando ed attuando la colorazione negativa. La tecnica è molto costosa e richiede personale tecnico esperto in microscopia elettronica. Il risultato ottenuto con la metodica ISEM è rappresentato nella figura 52.

Le tecniche fondate su reazioni immunoenzimatiche sono di semplice impiego, presentano costi contenuti ed hanno elevata specificità e sensibilità perché la risposta è di tipo immunologico ed enzimatico.

ELISA (*enzyme-linked immuno sorbent assay*), largamente applicato nei programmi di certificazione, eradicazione e quarantena e negli studi epidemiologici, di tassonomia e caratterizzazione dei virus, è un saggio su fase solida in cui un anticorpo specifico agisce in successione, intrappolando e rivelando la presenza della particella virale bersaglio (antigene), mediante l'uso di un enzima (ad esempio una fosfatasi alcalina, oppure la perossidasi di rafano) capace di determinare il viraggio di colore di un opportuno substrato. Generalmente sono usate piastre di polistirene a 96 pozzetti.

La metodica prevede, nell'ELISA diretta, le seguenti fasi:

- 1) sensibilizzazione dei pozzetti con gli anticorpi antivirali, attraverso il riempimento del pozzetto con l'antisiero. Le IgG aderiscono alle pareti;
- 2) lavaggio del pozzetto dove rimangono, legati alle pareti, i soli anticorpi;
- 3) intrappolamento del virus specifico da parte degli anticorpi. Ciò si ottiene con il riempimento del pozzetto con l'estratto del campione contenente l'eventuale virus da individuare;
- 4) lavaggio del pozzetto alle cui pareti restano adsorbiti gli anticorpi ed il virus (intrappolato sull'anticorpo);
- 5) legame delle IgG antivirali, appositamente coniugate ad un enzima (fosfatasi alcalina o perossidasi);
- 6) lavaggio del pozzetto dove restano le IgG (legate alla parete), il virus specifico (intrappolato sulle IgG) e le IgG coniugate con l'enzima (bloccate sul virus);
- 7) aggiunta del substrato specifico per l'enzima e colorazione gialla (se è presente l'enzima ed il virus per il quale si sta effettuando il test). Sono riportate, schematicamente, le fasi del test ELISA (figura 53) e l'aspetto di una piastra ELISA con 96 pozzetti (figura 54).

Nel caso di reazione positiva, nel pozzetto si sviluppa un colore, differente secondo il substrato utilizzato, d'intensità proporzionale alla concentrazione del virus. Le reazioni sono visibili ad occhio nudo, ma si può impiegare anche un lettore di piastre. In tal caso c'è la possibilità di registrare, con precisione, l'assorbanza di ogni singolo campione. Ciò rende il test utile per le determinazioni quantitative o per stimare il grado di correlazione sierologica tra virus diversi. Una variazione dello schema indicato caratterizza l'ELISA indiretta o TAS-ELISA (*triple antibody sandwich-ELISA*), in cui si usano due anticorpi contro lo stesso virus bersaglio prodotti da animali diversi ed un terzo anticorpo, definito *coniugato universale*, specifico per il secondo anticorpo, coniugato con l'enzima e commercialmente disponibile. La TAS-ELISA ha il vantaggio, rispetto all'ELISA diretta, di risolvere il problema della minore reattività degli anticorpi coniugati rispetto a quelli

nativi verso uno stesso antigene ed evita di preparare tanti coniugati quanti sono i sieri che si prevede di impiegare con l'uso del coniugato universale. In generale, l'ELISA possiede un elevato livello di sensibilità e consente finanche l'identificazione dei virus delle piante nei loro vettori.

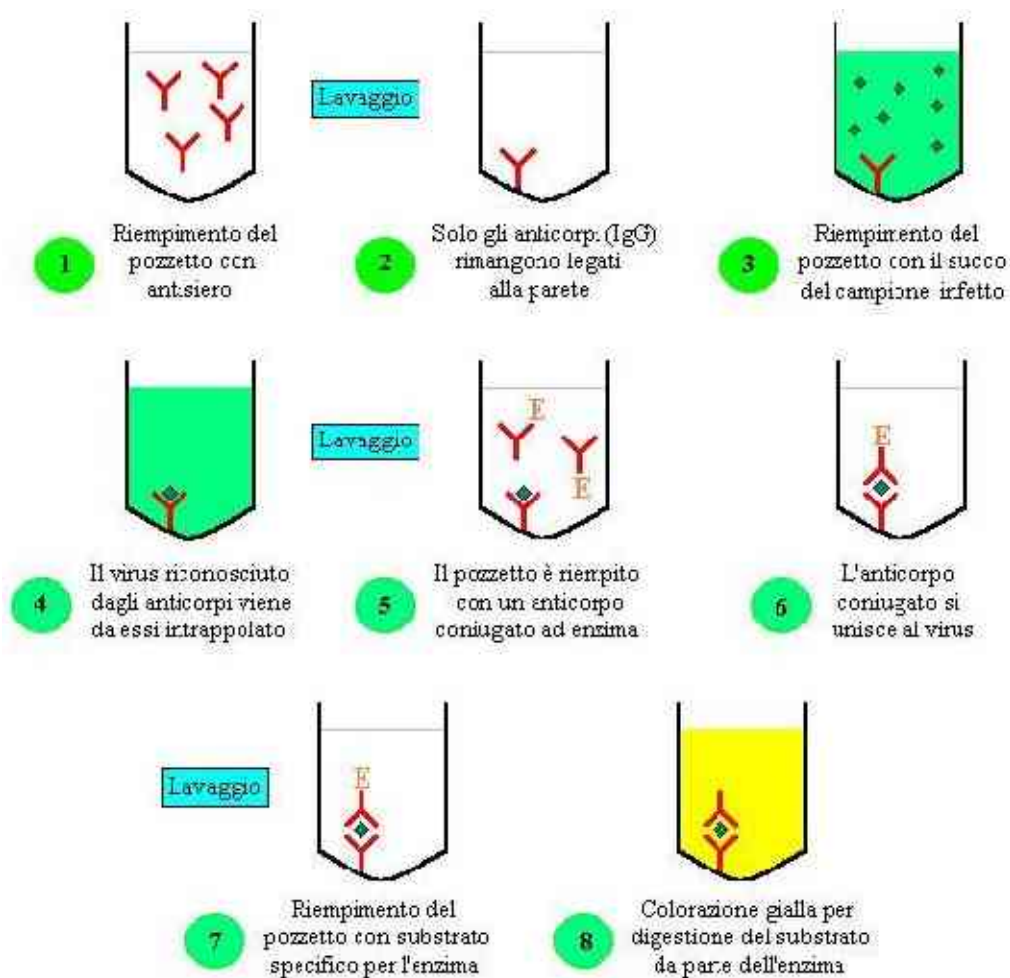


Fig. 53 – Schema delle diverse fasi del test ELISA diretta, in cui è usato sempre lo stesso anticorpo, prima in forma nativa e poi coniugato con l'enzima.

Altri saggi su fase solida sono il *Dot Blot*, *Western Blot*, *Dipstik*, *Tissue Blot*, che si differenziano dall'ELISA classica per l'impiego di un differente tipo di supporto (membrane di nitrocellulosa, nylon, polivinildifluoride), di sistemi amplificati con l'impiego del complesso avidina-biotina e di sistemi immuno-chemiluminescenti ed immuno-fluorescenti. Il *Dot Blot* ed il *Tissue Blot* sono semplici e di rapida esecuzione, tanto che il secondo può essere effettuato anche in pieno campo. Il metodo consiste nell'effettuare un taglio fresco sulla porzione di pianta da sottoporre al saggio e nell'appoggiare la sezione risultante dal taglio su una membrana di nylon o nitrocellulosa. In laboratorio, con le tecniche tradizionali ELISA, sarà svelata la presenza di virus nell'impronta di tessuto lasciata sulla membrana.

Le tecniche molecolari consentono l'identificazione anche di poche particelle virali, di scarso numero di cellule batteriche, di qualche unità di altri microrganismi

vegetali ed animali. La base dell'ibridazione molecolare si fonda sul fatto che, in condizioni ottimali di concentrazione salina e di temperatura, le sequenze complementari di acidi nucleici monocatenari si appaiono, formando una molecola bicatenaria stabile (ibrido). Ma affinché la metodica possa essere utilizzata a fine diagnostico è necessario che una delle due sequenze, di solito quella bersaglio, sia fissata ad un supporto solido e che la sequenza complementare, detta sonda, contenga un marcatore che fornisca il segnale necessario ad identificare le molecole ibride stabili che si sono formate durante la reazione.

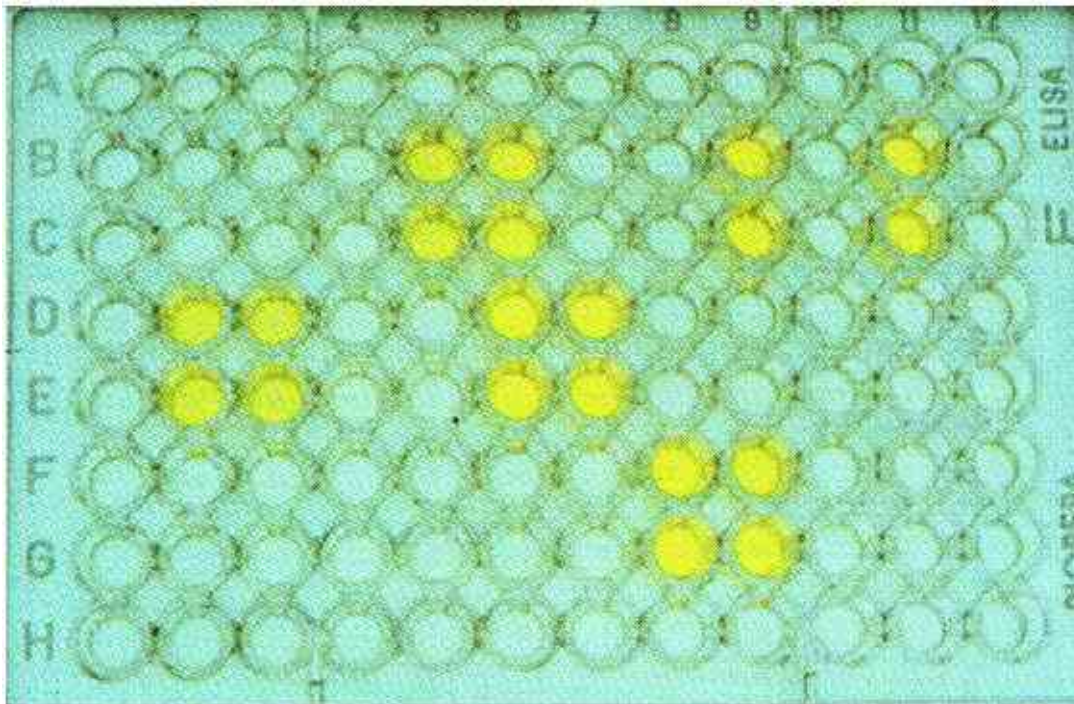


Fig. 54 – Piastra ELISA a 96 pozzetti per la lettura automatica ad un fotometro a 495 nm. I pozzetti positivi sono quelli gialli dove l'intensità di colore è proporzionale alla concentrazione del virus.

Le interazioni necessarie all'appaiamento di basi complementari costituiscono il fondamento dell'ibridazione molecolare e l'intero processo può essere sintetizzato in due fasi, la *denaturazione* e la *rinaturazione* o *ibridazione*. La separazione dei due filamenti di acido nucleico (denaturazione) avviene in un intervallo di temperatura molto ristretto ed è influenzato dalla composizione in basi azotate dell'acido nucleico, dalla concentrazione salina del mezzo, dalla presenza di sostanze che distruggono i legami idrogeno fra le basi (aldeide formica), dal pH, dalla percentuale d'appaiamenti incompleti (*mismatch*), dalla diversa stabilità degli ibridi (variabile secondo la seguente sequenza: DNA:DNA < RNA:DNA < RNA:RNA). La reazione di rinaturazione o formazione dell'ibrido è regolata dalla velocità di riassociazione (influenzata soprattutto dalla lunghezza dei filamenti dell'acido nucleico e dalla concentrazione di ciascun filamento nel mezzo) e dalla stabilità dell'ibrido neoformato. La formazione di ibridi RNA:DNA – nei quali la struttura secondaria più stabile dell'RNA fa sì che, per raggiungere la stessa velocità di riassociazione degli ibridi DNA:DNA, la concentrazione di RNA nel mezzo debba essere in largo eccesso rispetto a quella del DNA – è molto dipendente dalla concentrazione di ciascun filamento. Tutti questi parametri sono ormai standardizzati per

i diversi tipi d'ibridazione, ma una variabile che merita continua attenzione è la percentuale di *mismatch*. Così, 1% di appaiamenti incompleti, in molecole costituite da più di 100 paia di basi, riduce di 1 °C l'intervallo di temperatura in cui avviene la separazione dei due filamenti di acido nucleico. La percentuale di *mismatch* può essere valutata variando l'effetto delle condizioni d'ibridazione e di lavaggio sulle interazioni tra i filamenti complementari, incompletamente appaiati, di acido nucleico (*stringenza*). Per scopi diagnostici, gli appaiamenti incompleti, causati da piccole variazioni nella sequenza dei nucleotidi, sono utili per distinguere molecole molto simili tra loro. Per ottenere ibridazione tra filamenti scarsamente omologhi (vale a dire poco diversi nelle sequenze nucleotidiche di basi complementari) si devono applicare condizioni di bassa stringenza, in altre parole condizioni che hanno effetti minimi sulle interazioni tra gli stessi filamenti. Al contrario, nel caso si volessero selezionare ibridi con più elevata omologia di sequenza, si useranno condizioni d'elevata stringenza.

La fase mista, in cui la molecola bersaglio (il virus da diagnosticare) è fissata ad un supporto solido (una membrana di nylon o nitrocellulosa) e la sonda è mantenuta in sospensione, rappresenta un metodo versatile di diagnosi. Essa può essere realizzata in varie forme e fra queste l'ibridazione a macchia (*Dot Blot* o *Spot Hybridization*) che consiste nell'applicare sulla membrana diverse aliquote di 5-10 µL di estratto, ottenuto per macerazione del campione in soluzione alcalina, e poi nel sigillare la stessa membrana in una busta di plastica, insieme alla miscela d'ibridazione contenente la sonda marcata. Dopo l'ibridazione, il segnale emesso dalla sonda, che si è legata alle sequenze bersaglio presenti nei campioni infetti, impressiona una pellicola sensibile. E' possibile usare simultaneamente fino a sei sonde diverse nella stessa reazione di ibridazione senza osservare riduzioni apprezzabili nella sensibilità ed associando un segnale positivo alla presenza di uno dei sei virus nel campione. Se necessario, successivamente, con ibridazioni separate con le singole sonde, si potrà identificare ciascuno dei sei virus presenti nei soli campioni positivi all'analisi iniziale. L'ibrido molecolare ottenuto (cioè la molecola bicatenaria) con l'ibridazione può essere facilmente identificato mediante il marcatore portato dalla sonda.

Per quanto riguarda i tipi di marcatori usati, il più comune è il ^{32}P radioattivo. Questo può essere incorporato nella sonda durante la sintesi o legato all'estremità 5' della molecola sintetizzata mediante reazione enzimatica. E' preferibile tuttavia usare, quando possibile, sonde non radioattive (sonde fredde). A tal proposito, tra i marcatori risultati più soddisfacenti, si ricorda la digossigenina che è in grado di garantire da rischi di segnali aspecifici, dovuti ai tessuti vegetali presenti, perché questa sostanza è stata trovata soltanto in specie del genere *Digitalis*.

Le operazioni di pre-ibridazione, ibridazione e lavaggio sono fasi critiche per ottenere risultati attendibili. La funzione della pre-ibridazione, della durata di circa un'ora, è quella di saturare eventuali siti aspecifici presenti tanto sulla membrana utilizzata per immobilizzare il campione da analizzare, quanto sul contenitore (la busta di plastica). Nella fase d'ibridazione, la sonda marcata è aggiunta al contenitore e lasciata per 12-24 ore. Il lavaggio eliminerà tutto, eccetto l'ibrido formato. In queste fasi è importante scegliere le condizioni di stringenza (temperatura e forza ionica della miscela di pre-ibridazione, ibridazione e lavaggio) poiché, come già detto, in condizioni di bassa stringenza si favorisce la formazione di ibridi che possono essere aspecifici (incompletamente appaiati per la presenza di sequenze complementari non omologhe), mentre con l'alta stringenza si ottengono ibridi altamente omologhi.

Il segnale emesso, in caso di positività, è impressionato su una pellicola per raggi X che è tenuta in contatto per 1-24 ore, alla temperatura di -70 °C. L'intensità della macchia

è proporzionale alla concentrazione di acido nucleico virale presente nel campione. Nel caso siano stati usati marcatori freddi, come la biotina (la quale però ha il difetto di indurre segnali d'ibridazione aspecifica), dopo il lavaggio bisogna incubare in presenza di streptavidina che reagisce specificamente con la biotina inserita nella sonda e poi effettuare una seconda incubazione, in presenza di un enzima (fosfatasi alcalina) biotinilato, per legare l'enzima alla streptavidina. Il complesso sonda-biotina-streptavidina-biotina-enzima è incubato in opportuno substrato dove avviene lo sviluppo di una colorazione in corrispondenza degli ibridi molecolari che hanno resistito al lavaggio.

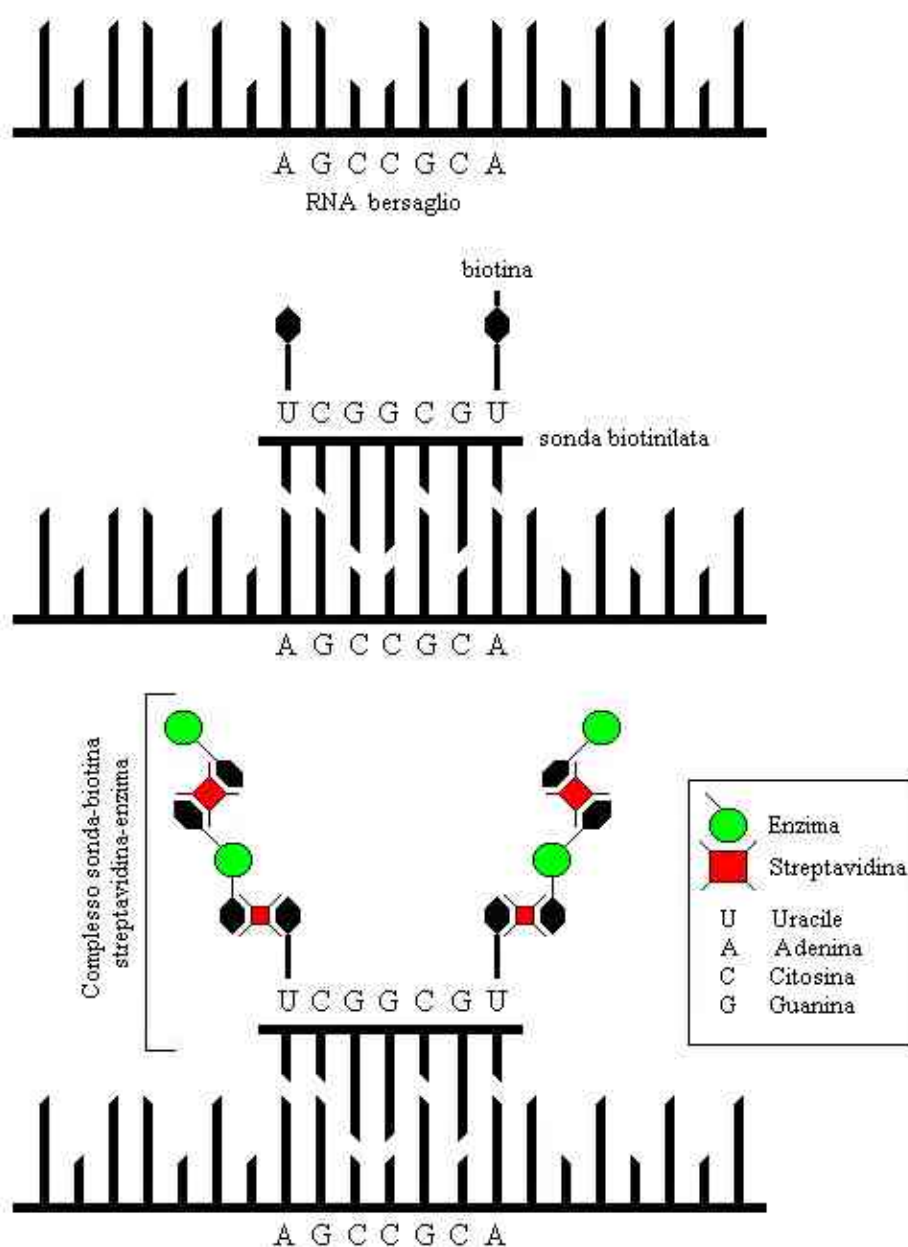


Fig. 55 – Schema di un sistema molecolare per il riconoscimento di una sequenza di RNA virale, mediante l'impiego di una sonda biotinilata.

La figura 55 fornisce una rappresentazione schematica del sistema molecolare che è impiegato per individuare una specifica sequenza di genoma virale con sonde biotinilate.

Quelli ora esposti sono i concetti principali su cui si basano le tecniche diagnostiche d'ibridazione molecolare.

L'esistenza di svariati ed ampi corredi commerciali consente di non soffermarci molto sull'allestimento di sonde clonate a DNA o sonde costituite da RNA trascritti *in vitro*.

Quando possibile, è consigliabile ricorrere all'uso di sonde a RNA (cRNA) per la maggiore stabilità degli ibridi RNA:RNA e RNA:DNA.

Ciò è molto importante in virologia vegetale poiché oltre il 75% dei virus delle piante ha un genoma a RNA ed anche i virus con genoma a DNA possono essere riconosciuti da trascritti complementari al DNA genomico.

I risultati ottenuti hanno dimostrato una maggiore sensibilità delle sonde a RNA rispetto alle sonde a DNA.

Un'altra tecnica molecolare di elevatissima specificità e sensibilità è quella denominata di amplificazione genica a catena o PCR (*polimerase chain reaction*) che ha trovato largo impiego nell'identificazione di virus, viroidi, micoplasmi, batteri, microfunghi ed anche di specie microscopiche del regno animale come, ad esempio, i nematodi e molte altre.

Il principio, che è alla base di questa tecnica, è basato sulla possibilità di aumentare *in vitro* la quantità di acido nucleico (DNA o RNA) bersaglio da individuare (*target*).

L'amplificazione, ossia la replicazione che porta all'incremento delle molecole di acido nucleico, è effettuata su un DNA utilizzato come stampo per la produzione di DNA ad esso complementari.

La sintesi avviene in presenza di spezzoni specifici di DNA, chiamati *primers*, i quali sono costituiti da corte sequenze nucleotidiche la cui funzione è quella di far partire la copiatura del DNA bersaglio e quindi la sua amplificazione.

Affinché ciò avvenga è indispensabile che ci sia una perfetta omologia di sequenza di nucleotidi fra DNA *primers* e DNA bersaglio.

Soltanto in tal caso s'innesci la reazione d'amplificazione e conseguente accumulo esponenziale (fino a 10^6 volte) *in vitro* della sequenza da individuare, ossia del frammento di DNA.

Il metodo consente di identificare specifiche sequenze di DNA presenti nel campione, anche in concentrazioni bassissime, proprio perché la sequenza di DNA usata come *primer* è specifica e la reazione è innescata anche in presenza di una sola molecola di DNA complementari.

Per usare questa metodica occorre conoscere la sequenza di una porzione del DNA da individuare o di cui si vuole verificare la presenza nel campione.

Tale porzione è lunga alcune centinaia di basi, ma sono state descritte amplificazioni di DNA costituito anche da alcune migliaia di basi.

I *primers* sono oligonucleotidi formati da 18-20 basi, ottenuti per sintesi chimica e scelti in modo tale che si accoppino specificamente per ognuna delle due eliche complementari di DNA da individuare, agli estremi della porzione scelta per l'amplificazione.

I *primers* sono poi costruiti per far procedere la sintesi in modo incrociato (estremità 5' per un'elica ed estremità 3' per l'altra).

Il DNA bersaglio è prima denaturato mediante riscaldamento, poi un enzima specifico, una polimerasi (innescata dai *primers*), costruisce una copia di ognuna delle due eliche ottenute dopo la denaturazione del DNA. Ciò consente di moltiplicare per due il numero iniziale di copie della porzione di DNA interessata.

I frammenti neosintetizzati sono poi separati dalla catena di DNA che ha funto da stampo mediante nuovo riscaldamento.

Il successivo abbassamento della temperatura permette una nuova associazione delle catene di DNA neoformate ai *primers* e consente una nuova sintesi di DNA complementare.

Ciò avviene per quanti cicli si vuole, con la conseguenza di incrementare la quantità di DNA ad ogni ciclo.

Come è stato detto, ad ogni ciclo, il DNA deve essere denaturato onde consentire alla polimerasi di innescare la nuova sintesi, poiché l'enzima opera in presenza di singole eliche.

La denaturazione avviene ad alta temperatura (fino a 94 °C) e ciò causa la distruzione anche della polimerasi la quale, così, non potrebbe più innescare il nuovo ciclo.

A ciò si è ovviato con la scoperta prima e la sintesi poi di una polimerasi altamente termostabile (95 °C), denominata *Taq* polimerasi, perché originariamente purificata da un batterio termofilo, presente in sorgenti d'acqua calda, il *Thermus aquaticus*.

Le tre fasi dell'amplificazione genica (appaiaimento dei *primers* al DNA bersaglio, sintesi e denaturazione) si svolgono a tre temperature crescenti e costituiscono un ciclo che è ripetuto da 20 a 40 volte.

Ogni volta, i frammenti di DNA fabbricati durante un ciclo si associano a loro volta ai *primers* specifici e sono poi nuovamente ricopati nel ciclo seguente.

L'amplificazione del frammento prescelto di DNA non è, quindi, una funzione lineare ma esponenziale e per n cicli l'amplificazione sarà 2^n volte.

Questa proprietà spiega l'enorme sensibilità di PCR nell'individuazione di specifiche sequenze.

Tale sensibilità dipende sia dalla specificità dei *primers* utilizzati, sia dalle condizioni in cui avviene l'ibridazione, quali la temperatura e le concentrazioni saline delle soluzioni usate per l'amplificazione (stringenza).

L'RNA non può essere amplificato direttamente, poiché la *Taq* polimerasi riconosce solo molecole di DNA quale stampo per la sintesi di filamenti complementari.

La PCR può essere applicata per l'amplificazione di RNA solo se preceduta dalla sintesi di un primo filamento di cDNA mediante trascrizione inversa (RT-PCR) e con l'impiego di uno specifico enzima, la trascrittasi inversa (*reverse transcriptase*).

E' possibile far avvenire la reazione di trascrizione inversa a temperature elevate (65 °C) le quali assicurano il mantenimento di uno stato parzialmente denaturato della molecola bersaglio di RNA ed ottenere, così, la sintesi di filamenti più lunghi di cDNA e, pertanto, più rappresentativi del genoma a RNA.

Ciò comporta l'impiego di *primers* antisenso (complementari) nel protocollo RT-PCR e di *primers* senso (omologhi) nella PCR avente come bersaglio il DNA.

La figura 56 riporta, schematicamente, le varie fasi sopra descritte ed i cicli di replicazione del DNA durante l'amplificazione genica.

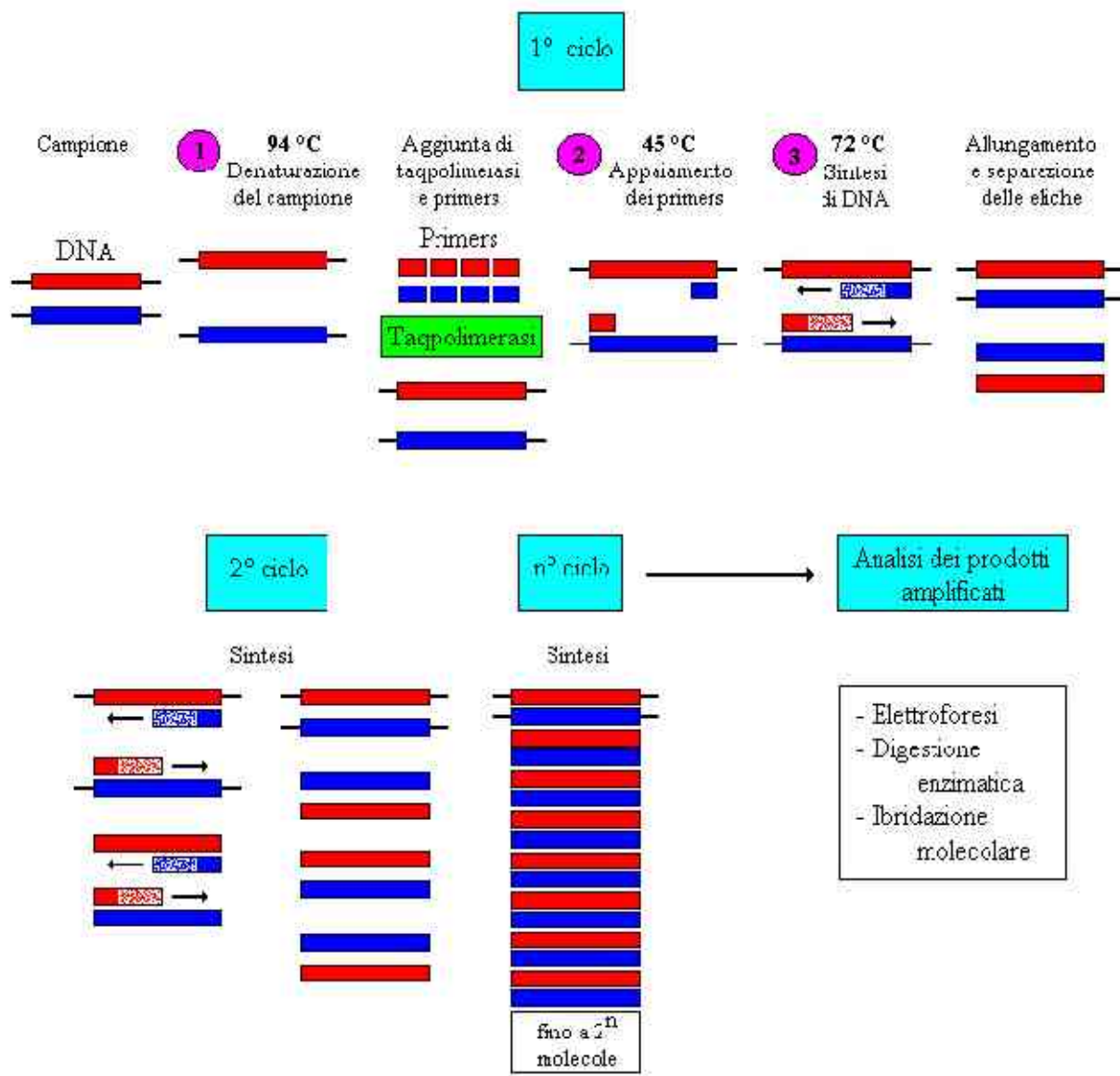


Fig. 56 – Schema delle fasi e dei cicli dell'amplificazione del DNA, nella metodologia di PCR.

PEDOFAUNA

Il complesso di organismi appartenente al regno animale, che vive per l'intero ciclo biologico o per una parte di esso nel terreno, costituisce la pedofauna, indicata anche come fauna edafica o fauna del suolo.

Gli organismi della pedofauna sono distinti, in primo luogo, in rapporto alle loro dimensioni.

Vanno a costituire la *nanofauna* se presentano dimensioni inferiori a 0,02 mm come i più piccoli protozoi. Sono da annoverare nella *microfauna* se hanno dimensioni comprese tra 0,02 e 0,2 mm, come ad esempio i gastrotrichi ed i rizopodi, alcuni rotiferi ed alcuni nematodi.

Appartengono alla *mesofauna* se le loro dimensioni sono comprese tra 0,2 e 10,4 mm, come la maggior parte dei microartropodi (con zampe articolate), i tardigradi, i rotiferi, i micromolluschi, molti microenchitreidi, i nematodi, alcuni turbellari. Sono riconducibili alla *macrofauna* se le loro dimensioni superano i 10,4 mm fino a 20 mm, come molti insetti, alcuni araneidi, chilopodi, diplopodi, isopodi, enchitreidi, alcuni turbellari, alcuni lumbricidi.

Infine, sono da includere nella *megafauna* se le loro dimensioni superano i 20 mm, come molti lumbricidi, nemertini, insettivori e muridi (figura 57).

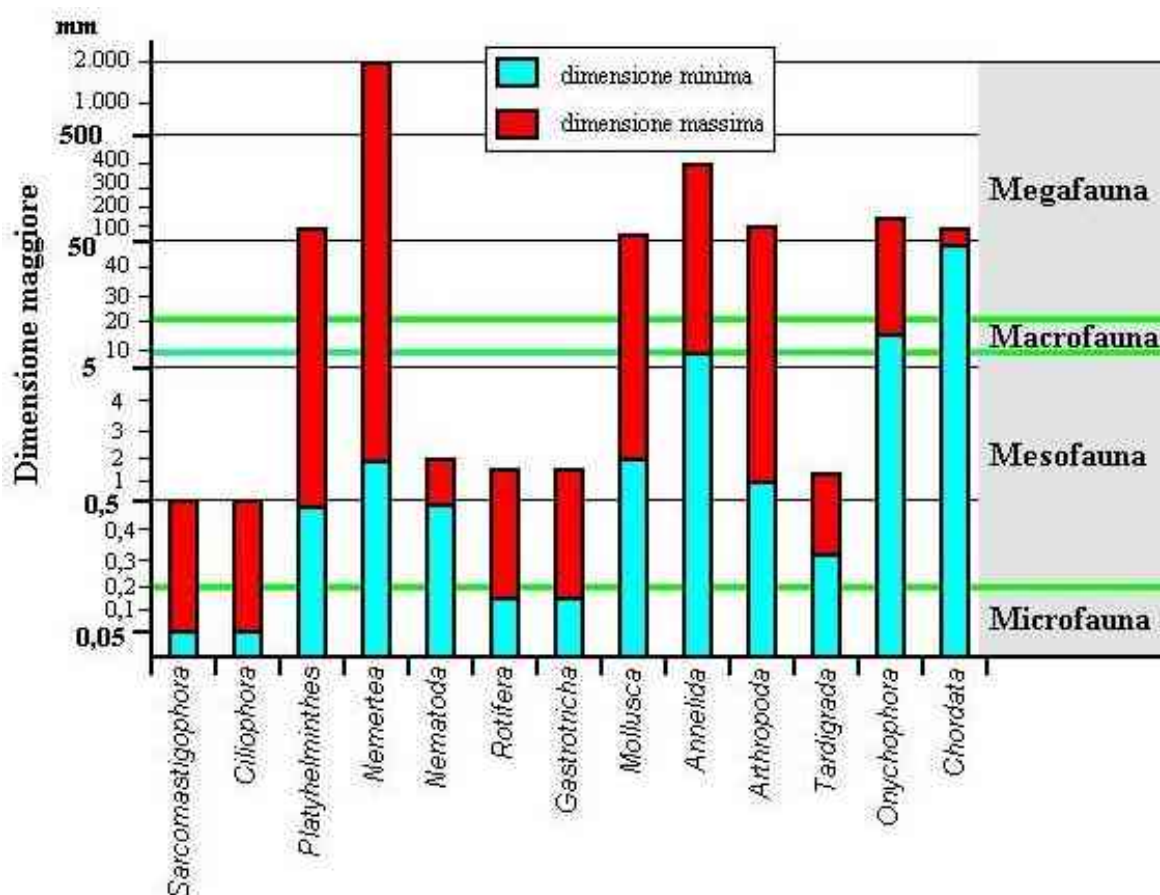


Figura 57 – Principali *phyla* della pedofauna in rapporto alle loro dimensioni.

Va chiarito che, anche se molti di questi raggruppamenti animali ora indicati presentano dimensioni molto ridotte, tanto da essere stentatamente osservabili ad occhio nudo, essi appartengono, tuttavia, alla mesofauna e non alla microfauna, cui vanno invece ascritti soltanto quegli organismi osservabili unicamente al microscopio e, pertanto, di competenza della microbiologia (i protozoi, alcune specie di acari, pochissime specie di nematodi, qualche tardigrado e rotifero).

Quegli organismi che vivono per tutto il loro ciclo biologico obbligatoriamente nel terreno, senza mai lasciare il loro *habitat*, assolutamente ipogeo, sono detti *edafobi*, mentre se essi soltanto prediligono vivere nel suolo ed hanno la possibilità di allontanarsi sono denominati *edafofili*. Si chiamano *edafoxeni* quegli animali che soltanto saltuariamente ed occasionalmente possono trovarsi nel terreno.

In rapporto alla posizione che occupano normalmente lungo la verticale del terreno, gli organismi della pedofauna sono detti *epiedafici* quando occupano gli strati più superficiali, *euedafici* quelli che vivono stabilmente negli strati più profondi mai raggiunti dai raggi luminosi, *emiedafici* quelli che si ritrovano in posizioni intermedie ed hanno una certa tendenza a portarsi negli strati più profondi del suolo.

Esiste ancora un'importante differenziazione della pedofauna che prende in esame la fonte di ossigeno necessaria agli organismi animali per attuare i processi respiratori e di ossidazione.

Se l'ossigeno viene preso dall'aria, atmosferica (gli organismi che stanno alla superficie del suolo) o tellurica, presente nei pori (quelli che vivono più in profondità), essi si dicono *atmobiologici*; quelli che assumono l'ossigeno disciolto nei vari tipi di acqua del terreno sono detti *idrobiologici*.

Tale enorme differenza fisiologica comportamentale mette in evidenza come il terreno riesce ad accogliere organismi dall'origine la più disparata, provenienti da ecosistemi terrestri e da alcune diramazioni ecologiche dell'idrosfera terrestre e come l'evoluzione filogenetica ed ontogenetica abbia indotto strabilianti adattamenti e grandi capacità omeostatiche negli organismi della fauna edafica.

Gli organismi del suolo sono caratterizzati da adattamenti strutturali molto differenziati riguardanti le dimensioni corporee, il fatto di essere atteri o alati, la presenza di zampe specializzate (fossorie, scavatorie, saltatorie), gli occhi e la pigmentazione e numerosi altri caratteri.

Tra gli appartenenti all'*atmobiologia* esistono alcuni specifici animali del suolo come i sinfili, pauropodi, insetti apterigoti (proturi, collemboli, dipluri).

Tutti questi, anche se filogeneticamente collegati tra loro e con altri gruppi non edafici, ma appartenenti al *phylum Arthropoda*, sono non ben correlabili con gli animali viventi al di fuori del terreno.

Molto probabilmente essi si sono originati nel terreno, dove si sono evoluti e non si sono mai allontanati, tanto da raggiungere, come nel caso dei collemboli, densità molto elevate.

Nel terreno, sempre legati all'*atmobiologia*, si trovano molti animali che si ritrovano comunemente anche nell'ambiente epigeo. Si ricordano gli araneidi, gli pseudoscorpioni, gli opilioni, gli acari, i crostacei isopodi, i diplopodi o millepiedi, i chilopodi o centopiedi e numerosi insetti pterigoti tra i quali ditteri e coleotteri. Vanno anche annoverati molti molluschi polmonati e, tra i mammiferi, gli insettivori ed i roditori.

Appartengono all'*idrobiologia* quegli animali che riescono a vivere nel terreno solo se è presente un certo grado di umidità. Sono fra questi alcuni turbellari, irudinei, crostacei copepodi e molte specie di oligocheti delle famiglie degli enchitreidi e dei lumbricidi.

Quando le condizioni d'umidità diventano sfavorevoli, molti microrganismi edafici sviluppano strutture protettive, come le cisti, entro cui si rifugiano durante l'attesa del ritorno delle condizioni favorevoli.

Altri gruppi di organismi, come i nematodi, i rotiferi, i tardigradi ed alcuni protozoi, in condizioni di carenza d'umidità nel suolo, non sviluppano strutture protettive, ma tendono a perdere gran parte dell'acqua del proprio organismo, entrando in una condizione di vita latente (anidrobiosi) da cui escono soltanto con il ripristino di un ambiente idoneo.

Da un punto di vista delle esigenze alimentari gli organismi della pedofauna si distinguono in *zoofagi* quando si comportano da predatori o parassiti di altri animali edafici, *fitofagi* se sono predatori o parassiti di vegetali, *detritivori* o *saprofagi*, distinti in *zoosaprofagi* (detti anche *necrofagi*), *fitosaprofagi* e *polisaprofagi* a seconda che si nutrono, rispettivamente, delle spoglie di animali oppure di resti vegetali, oppure di ambedue, comunque a carico della materia organica in decomposizione. Si ricordano ancora i *coprofagi* e gli *onnivori* se si nutrono di escrementi o di tutto quello di cui possono disporre come alimento. Infine, molti organismi animali del suolo ingeriscono terra (*geofagi*) o materiali fangosi (*limnifagi*).

La locomozione dei diversi organismi del suolo consente di distinguerli ancora in *nuotatori*, quando vivono nei pori pieni d'acqua del terreno o su esili pellicole idriche che si formano sulle particelle solide del terreno e sulle superfici dei vegetali (flagellati, ciliati, alcuni nematodi e rotiferi), in *reptanti* (rizopodi tecati, rotiferi, nematodi, tardigradi, enchitreidi, lumbricidi, miriapodi, isopodi, acari, pseudoscorpioni, chilopodi, collemboli e molte larve d'insetti) e in *scavatori* (molti di quelli già citati, come enchitreidi, lumbricidi e miriapodi, cui si aggiungono vertebrati ed, in particolare, mammiferi). Gli organismi reptanti vivono principalmente nella lettiera, materiale organico alla superficie del terreno costituito essenzialmente da foglie morte ed altri residui di piante superiori, avente una funzione molto importante nella formazione dell'humus.

La pedofauna è oggetto di studio specializzato nell'ambito della zoologia. Nello studio della pedofauna molto c'è ancora da apprendere, sia perché essa è ancora scarsamente conosciuta e quindi suscettibile di importanti scoperte nel campo della sistematica, della filogenesi e della zoogeografia, sia perché di grande importanza sono le conoscenze sull'adattamento morfologico, fisiologico e comportamentale.

Da un punto di vista applicativo, occorre evidenziare il ruolo fondamentale che la pedofauna svolge nei processi d'umificazione e trasformazione delle sostanze vegetali.

In particolare, animali come gli isopodi, i lumbricidi, gli enchitreidi ingeriscono terra e contribuiscono a formare i complessi umo-argillosi di grande importanza per la fertilità fisica del terreno e per la stabilità strutturale degli aggregati.

In tal modo, il terreno viene arricchito di sostanze organiche ed è anche ben rimescolato ed aerato. La presenza di una pedofauna, ricca ed equilibrata, è indispensabile per mantenere nel terreno le condizioni favorevoli per la vita e lo sviluppo delle piante.

Nella figura 58 è riportata la rappresentazione qualitativa (i diversi e principali raggruppamenti faunistici del suolo) e quantitativa (il numero e peso dei gruppi faunistici presenti nel terreno), nonché l'attività respiratoria (espressa come consumo di milligrammi d'ossigeno per ora) della pedofauna, riferita ad un metro quadrato di terra bruna non coltivata delle regioni temperate.

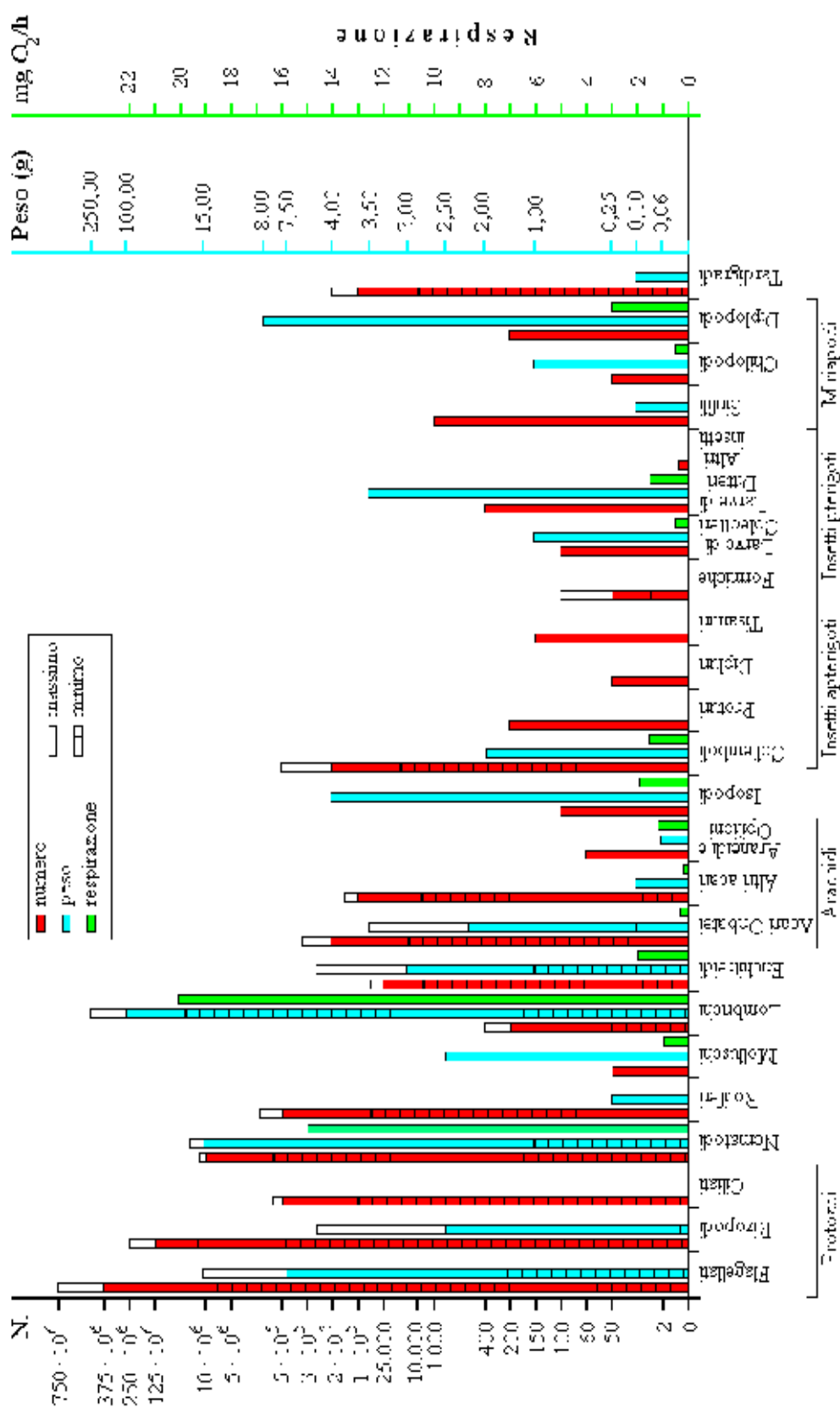


Fig. 58 Esempio di ripartizione della fauna suolo bruno non coltivato delle regioni temperate.

Finora sono stati citati i nomi di moltissimi gruppi d'organismi del regno animale, da quelli unicellulari, come i protozoi, a quelli che stanno più in alto nella piramide tassonomica, come i mammiferi. Ciascuno di questi gruppi sarà esaminato per avere una conoscenza più approfondita degli organismi del terreno che compartecipano a rendere il substrato come qualcosa di vivo e vitale e non un semplice sostegno meccanico.

Principali gruppi tassonomici della pedofauna

I cinque regni della vita sono il regno *Monera* (batteri ed alghe azzurre o cianobatteri), il regno *Protista* (protozoi ed alghe unicellulari), il regno *Fungi* (funghi), il regno *Plantae* (alghe pluricellulari e piante) ed il regno *Animalia* (animali metazoi).

Tutti gli animali sono pluricellulari ed eucarioti, cioè le loro cellule sono provviste di un nucleo limitato da una membrana e come gruppo tassonomico costituiscono i metazoi. Gli organismi eucarioti unicellulari, comprendenti i protozoi, un tempo erano considerati membri del regno animale, mentre oggi sono collocati nel regno dei protisti e, come i metazoi, la maggior parte di essi sono mobili ed eterotrofi.

Nello studio degli animali del terreno, un valido aiuto potrà essere costituito da una certa conoscenza delle principali suddivisioni del regno animale e del modo in cui gli zoologi classificano gli animali.

Il regno animale è classificato in gruppi gerarchici detti *categorie tassonomiche* rappresentate fondamentalmente dal *phylum*, classe, ordine, famiglia, genere e specie. La prima (detta anche tipo) è quella più inclusiva, l'ultima è quella meno inclusiva poiché comprende soltanto quegli individui isolati riproduttivamente, poiché sono capaci di accoppiarsi e produrre prole fertile soltanto con i membri conspecifici. Gli ibridi di due specie diverse, ammesso che siano vitali, sono, di solito, non fertili. Le specie sono generalmente denominate con due nomi latinizzati e si indica, con il primo, il genere in cui è classificata la specie e, con il secondo (epiteto specifico), una descrizione.

Al di sopra della specie, le categorie tassonomiche sono definite in base ad un giudizio soggettivo. Le specie sono collocate in generi, i generi sono classificati in famiglie e così via, sulla base di un'accurata considerazione dell'anatomia, delle modalità di sviluppo, della costituzione biochimica e d'altri dati accertati riguardanti le somiglianze e le diversità. Le categorie tassonomiche indicate sono quelle principali, ma ciascuna di esse può essere distinta in sottogruppi e, pertanto, un *phylum* in *subphyla*, la classe in sottoclassi e finanche una specie può avere sottospecie definite da un carattere esclusivo, come il colore o la lunghezza di un'appendice.

I principali protozoi e metazoi che interessano l'ambiente edafico sono di seguito esaminati, allo scopo di poterli riconoscerli sommariamente e di potere evidenziare le principali diversità anatomiche e morfologiche, biologiche e fisiologiche. Eventuali ulteriori approfondimenti, circa il riconoscimento, potranno essere realizzati ricorrendo all'aiuto di studiosi specialisti del gruppo tassonomico cui l'individuo animale appartiene.

PROTOZOI

Il terreno è popolato da protozoi, organismi eucarioti, unicellulari, simili ad animali, collocati al primo posto in una sequenza filogenetica, viventi come predatori di batteri e di funghi. Come tali, i protozoi appartengono al regno *Protista* ed includono circa 32.000 specie conosciute. I protozoi sono il punto di partenza per lo studio della

diversità animale, poiché somigliano agli animali nel modo di nutrizione e nell'essere attivamente mobili. Quelli che interessano il terreno sono classificati nei *phyla Mastigophora* e *Ciliophora*. Al primo appartengono i rizopodi (provvisi di pseudopodi), i flagellati (dotati di flagelli) e gli ameboflagellati che hanno pseudopodi e flagelli durante differenti stadi del ciclo biologico. Al secondo appartengono i ciliati.

Molti ciliati sono specie fossili, di cui è residuo il guscio calcareo che tanto ha contribuito all'orogenesi ed alla formazione delle terre emerse. I calcari nummulitici dell'Eocene sono quasi interamente formati da foraminiferi fossili chiamati "nummuliti" per l'aspetto somigliante ad una moneta (figura 59).

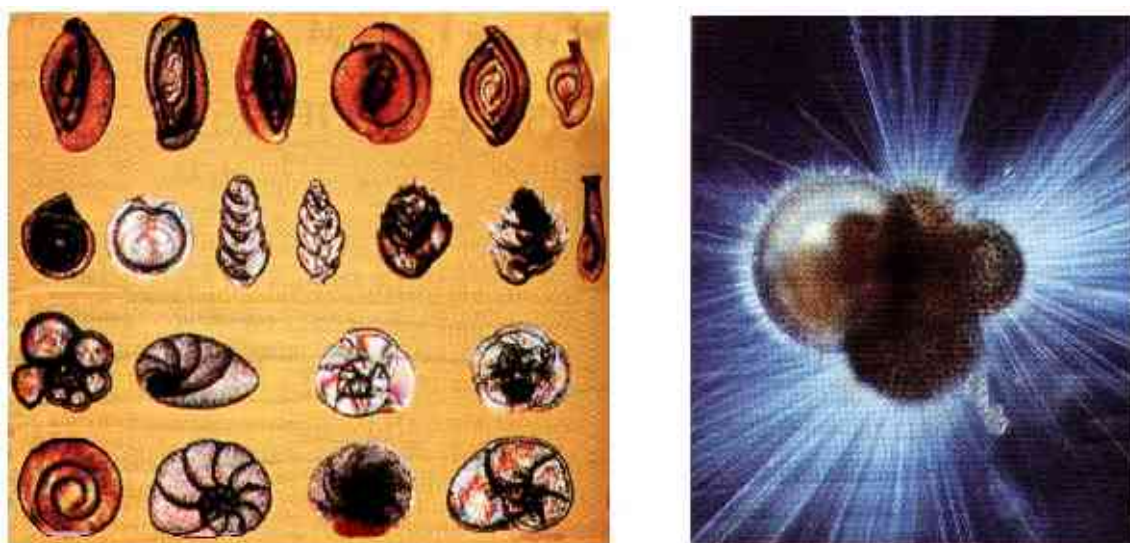


Fig. 59 – Gusci calcarei di amebe marine (foraminiferi), la cui sedimentazione avviene incessantemente con formazione di depositi di notevole spessore che, nel corso dei millenni, i fenomeni orogenetici portano alla superficie, con la formazione delle terre emerse. A destra, particolare di un foraminifero vivente in una nicchia calcarea pluriloculare, con i numerosi sottili pseudopodi (reticulopodi o mixopodi), sporgenti dal guscio (da Mitchell *et al.*, 1999).

I rizopodi comprendono organismi costituiti da una massa protoplasmatica circondata da una pellicola flessibile ed esseri viventi in cui tale pellicola è rigida, a causa della tipica composizione che include la chitina o diversi composti silicei. La pellicola presenta aperture da cui emergono sottili strie protoplasmatiche.

I flagellati sono mobili per uno o più flagelli, sono rivestiti da una pellicola formata da una o più membrane cellulari e si muovono nella fase liquida del terreno.

Molti flagellati sono autotrofi simili a piante e contengono organuli verdi, giallastri o rossi detti plastidi.

Tra gli ameboflagellati, aventi sia uno stadio ameboide, sia uno stadio flagellato, si ricorda la *Naegleria gruberi* che vive nel terreno umido, ricco di sostanza organica. Questa specie forma cisti dormienti per resistere all'essiccazione ed al gelo.

Amebe del genere *Amoeba* (figura 60a) e *Naegleria* sono diffuse nel terreno dove si nutrono di batteri ed altri piccoli organismi, finanche di minuti rotiferi. Alcune specie sembrano preferire suoli acidi, poveri di batteri o ricchi di sostanza organica. Si

alimentano di detriti animali e vegetali, in particolare funghi, ed anche di batteri ed alghe. I generi *Arcella* (figura 60d) e *Microchlamys* appaiono subito dopo la caduta delle foglie, di cui iniziano la decomposizione. Il genere *Euglypha* (figura 60e) è comune nell'orizzonte F del suolo. *Diffugia* e *Phryganella* preferiscono l'orizzonte H, dove la porosità è più conforme alla loro forma emisferica. Generalmente, i terreni coltivati sono poveri di amebe, ma il genere *Cryptodiffugia* (*Geococcus*) è stato comunemente ritrovato in tali suoli. *Actinophrys* (figura 60g) è confinato in terreni molto umidi, *Clathrulina* è un genere sedentario. Grandi rizopodi predatori, fino a 3 mm larghi, possono essere molto numerosi nel suolo, anche se il loro rilevamento è di difficile attuazione.

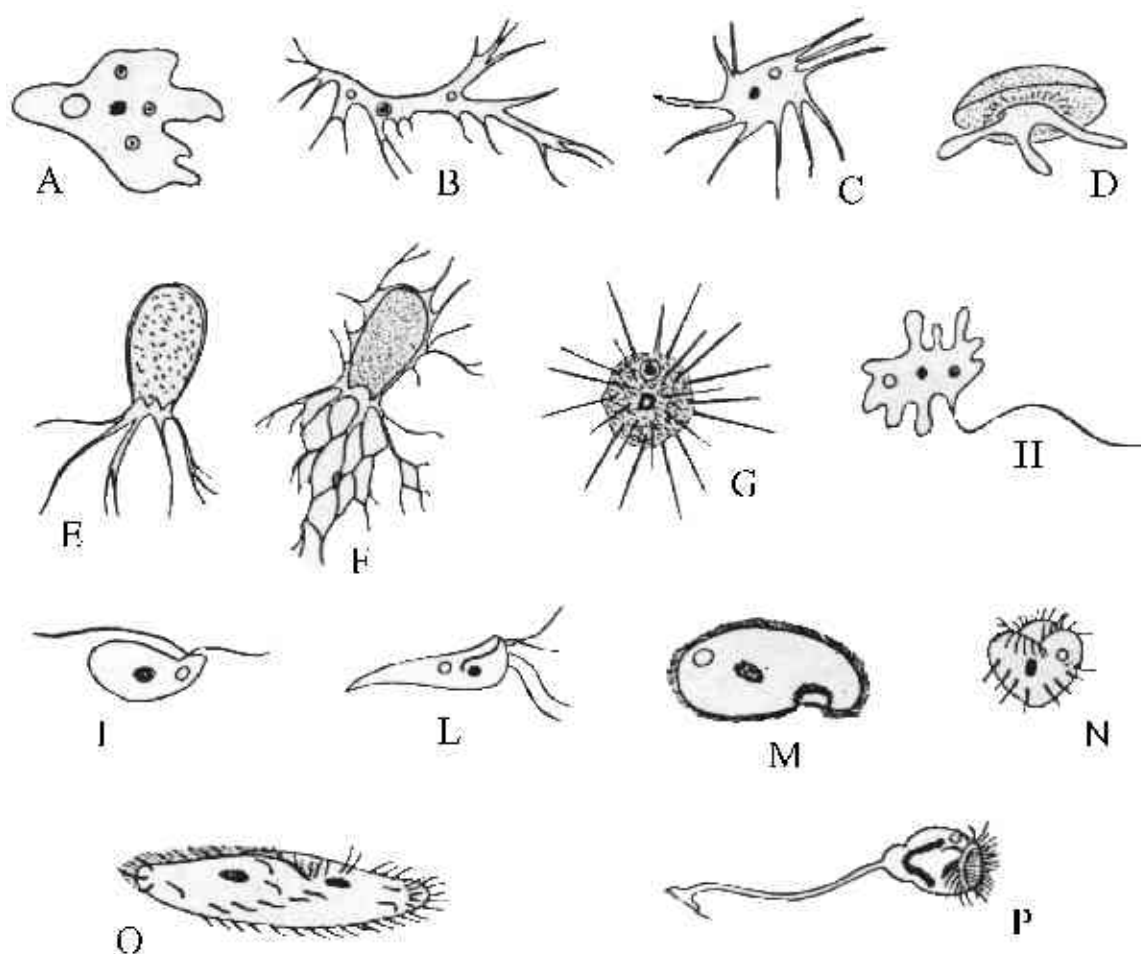


Fig. 60 – Forme schematiche di alcuni generi di protozoi viventi nel terreno. *Rhizopoda*: A) *Amoeba*, B) *Biomyxa*, C) *Nuclearia*, D) *Arcella*, E) *Euglypha*, F) *Allogromia*, G) *Actinophrys*. *Mastigophora*: H) *Mastigamoeba*, I) *Bodo*, L) *Tetramita*. *Ciliophora*: M) *Colpidium*, N) *Halteria*, O) *Gonostomum*, P) *Vorticella*.

I flagellati, per sopravvivere, debbono permanere costantemente nell'ambito di un film costantemente umido. Sono frequenti nell'acqua dove assumono le maggiori dimensioni e le più elevate densità di popolazione. Caratteristici flagellati del terreno sono i generi *Bodo* (figura 60i), *Heteromitus*, *Tetramita* (figura 60l), *Oikomonas* e *Cercomonas*. In particolare, quest'ultimo è molto resistente all'evaporazione. I flagellati si nutrono normalmente di batteri.

I ciliati sono anch'essi liberamente mobili, ma si distinguono dai precedenti per avere molte ciglia che consentono mobilità alle cellule e permettono di convogliare gli alimenti nel citostoma (bocca). I ciliati sono presenti nel terreno in gran numero, ma essi sono attivi soltanto in sottili strati, film, d'umidità. Alcune specie vivono soprattutto in acqua dove si moltiplicano attivamente. I generi di ciliati *Colpidium* (figura 60m), *Colpoda*, *Chilodon* e *Halteria* (figura 60n) sono caratteristici per la buona capacità di colonizzare il suolo, ma ancora molti altri, come il genere *Gonostomum* (figura 60o) ed il sedentario *Vorticella* (figura 60p) possono essere ritrovati. Tra i ciliati che possono essere rilevati nel terreno si ricorda anche il genere *Paramecium* sp. (figura 61), con caratteristiche fortemente ubiquitarie.

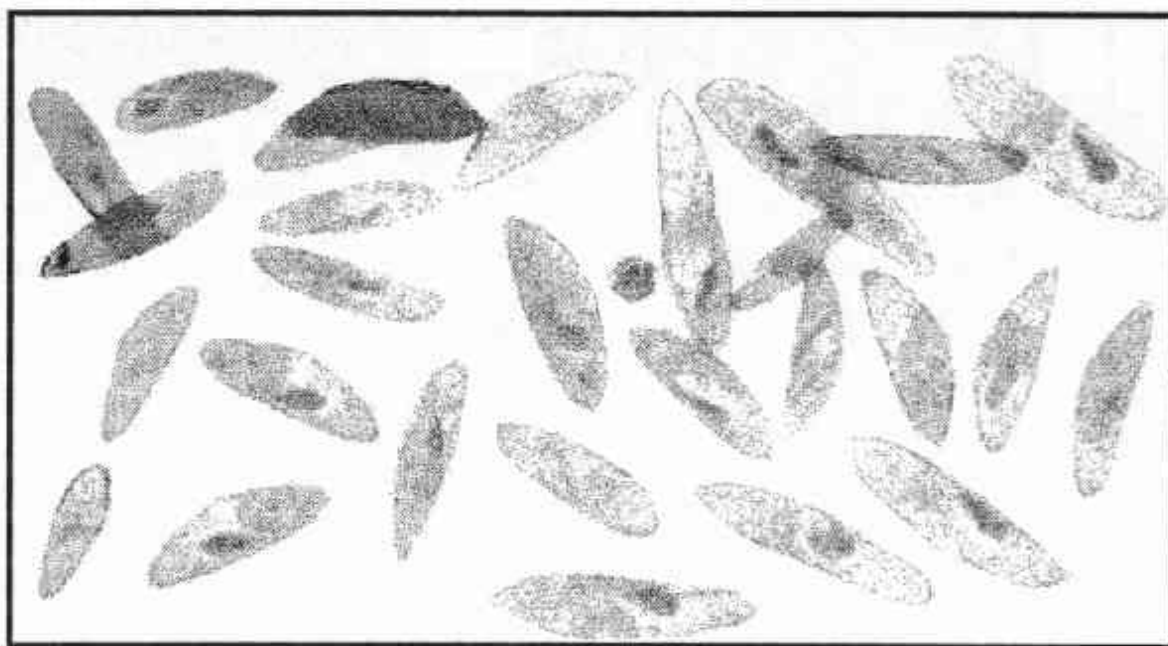


Fig. 61 – Il genere *Paramecium* è uno dei membri più noti del *Phylum Ciliophora* (I = 200 x).

Le analisi dei protozoi del terreno dimostrano che i rizopodi ed i flagellati sono più abbondanti dei ciliati. In alcuni terreni coltivati a grano furono trovati 1.500 amebe, 32.000 flagellati e solo 20 ciliati.

I protozoi, in condizioni avverse, sono capaci di entrare in uno stadio di quiescenza, producendo cisti capaci di dar luogo ad individui attivi anche dopo decine di anni. Le cisti sono molto resistenti agli acidi, il che rende possibile discriminare la carica dei protozoi in due frazioni, quella dei protozoi attivi e quella dei protozoi incistati, attraverso l'esame del terreno, prima e dopo un trattamento del campione con una soluzione al 2% di acido cloridrico. Le cisti sono molto resistenti al calore ed al disseccamento e possono essere trasportate dal vento anche a notevoli distanze.

I protozoi del suolo si nutrono di batteri, funghi e lieviti, anche se evitano attentamente alcune specie come il *Bacterium prodigiosum* (caratteristico per il suo colore rosso sangue), mentre altre sono addirittura tossiche. I protozoi, quindi, sono attivi antagonisti dei batteri e di altri microrganismi del terreno da un lato, ma possono anche diffondere le spore microbiche in punti distanti da quelli dove si sono alimentati.

I protozoi sono indirettamente capaci di stimolare le attività della pedomicroflora

ed interferire con la rizosfera delle piante. L'azione dei protozoi sulle radici è in relazione al fatto che essi influenzano la produzione di ormoni, come ad esempio l'acido indolacetico o sostanze analoghe, in batteri e funghi. Tali sostanze sono assunte dalle radici, si comportano come dei veri e propri fitoregolatori e modulano la crescita delle piante.

Rispetto alla loro attività trofica, i protozoi sono dei predatori ma anche dei saprofagi, poiché sono capaci di alimentarsi di sostanza organica in decomposizione. I protozoi presentano, pertanto, tutte le forme conosciute di eterotrofismo.

Parecchie specie conducono vita libera e si nutrono di microfauna, alcune sono saprofite ed altre possono essere parassite, commensali, o predatrici di animali, piante o di altri protozoi, compresi talvolta i membri della stessa specie (cannibalismo). Pochissime informazioni si hanno sulla loro capacità di degradare e sintetizzare la sostanza organica del terreno.

I protozoi del terreno sembrano essere tolleranti alle condizioni più diverse e molti sono distribuiti in tutto il mondo, su scala planetaria. Sono note più di 250 specie di protozoi che vivono nel terreno ed alcune di esse possono sopravvivere soltanto su di un substrato pedologico. Molto resta ancora da scoprire circa il preciso ruolo dei protozoi nel terreno ed un fatto, che è chiaramente emerso finora, è quello per il quale i protozoi che si alimentano di batteri non sono necessariamente dannosi alla fertilità del suolo.

Molto spesso l'esercizio dell'agricoltura, che comporta in diversi casi la somministrazione di geodisinfestanti, ha un ruolo negativo sui protozoi del terreno e, pertanto, è necessaria l'applicazione di adeguate pratiche agronomiche capaci di indurre e stabilire un opportuno equilibrio. Di conseguenza potrebbe ritenersi utile un adeguato monitoraggio dei protozoi tellurici e delle altre diverse comunità zoologiche del terreno, affinché si possa giungere ad una buona conoscenza e comprensione dei complessi aspetti geoecologici.

METAZOI

I metazoi sono tutti gli animali conosciuti che vanno a costituire il regno *Animalia*. Essi sono organismi eucarioti, pluricellulari, eterotrofi, mobili e privi di parete cellulare. Sotto l'aspetto pedologico, i *phyla* che presentano degli interessi, da quelli meno complessi e meno evoluti fino a quelli più complicati e con elevato grado di specializzazione, sono numerosi.

Alcuni *phyla* sono di seguito presi in considerazione per le loro relazioni con l'ambiente tellurico, in generale, e per le connessioni esistenti con gli altri organismi del terreno o con le piante coltivate.

Platyhelminthes

Il *phylum Platyhelminthes* è uno dei tre appartenenti agli animali acelomati (privi di una cavità del corpo). Molti sono parassiti dell'uomo e degli animali.

La classe *Turbellaria* è quella che conduce vita libera ed annovera alcune specie presenti nel terreno, viventi sotto le foglie bagnate e ad attività predatrice. Alcuni generi vivono in terreni tropicali ed includono specie vivaci e colorate, dall'aspetto brillante.

I turbellari hanno dimensioni che vanno da mezzo millimetro fino ad oltre 30 cm. Si ricorda la specie *Bipalium kewense* che vive in alcuni terreni di varie parti del mondo e la cui lunghezza può essere di 30 cm, con un capo curiosamente espanso. Le specie di dimensioni più moderate sono quelle del genere *Rhynchodemus*. *R. terrestris* è una specie

comune che vive sotto il tronco di alberi, nella vegetazione in decomposizione, fra le foglie umide ed il muschio bagnato. Si alimenta di minuti molluschi e vermi oligocheti, spesso procedendo sopra il terreno durante la notte. *R. britannicus* è una specie meno conosciuta, simile alla precedente ma con abitudini strettamente sotterranee. *Prorhynchus stagnalis* è uno dei pochi turbellari capace di vivere sia in acqua corrente, sia nel terreno.

I turbellari del terreno, le planarie, non sono numerosi anche se alcuni studi hanno rilevato la presenza di un gran numero di turbellari, di piccoli rabdoceli ed alleloceli, viventi in un sottile film d'acqua, fra le foglie morte, in certi ricchi terreni di bosco. Questi vermi apparentemente incistano in condizioni ambientali siccitose e non sembrano resistere sufficientemente a prolungate situazioni di secco o d'inondazione.

I microturbellari del suolo si nutrono di batteri, alghe, nematodi, rotiferi ed anche diatomee, oltre che microinvertebrati. Questi animali sono a loro volta predati da altri ed entrano a far parte di catene alimentari di cui non tutto è ben noto. Anche la loro diffusione, le fluttuazioni di popolazione, le loro attività sulle particelle organiche del terreno dovrebbe essere oggetto di studio e di ricerca.

Nemertea

Il *phylum Nemertea* è il secondo appartenente agli organismi acelomati, vermiformi ed a simmetria bilaterale. Esistono circa 800 specie appartenenti a questo *phylum*, detto anche *Rhynchocoela* per il carattere distintivo rappresentato da una proboscide o tromba, lungo tubo cavo tenuto in una cavità (detta *rincocete*) piena di liquido.

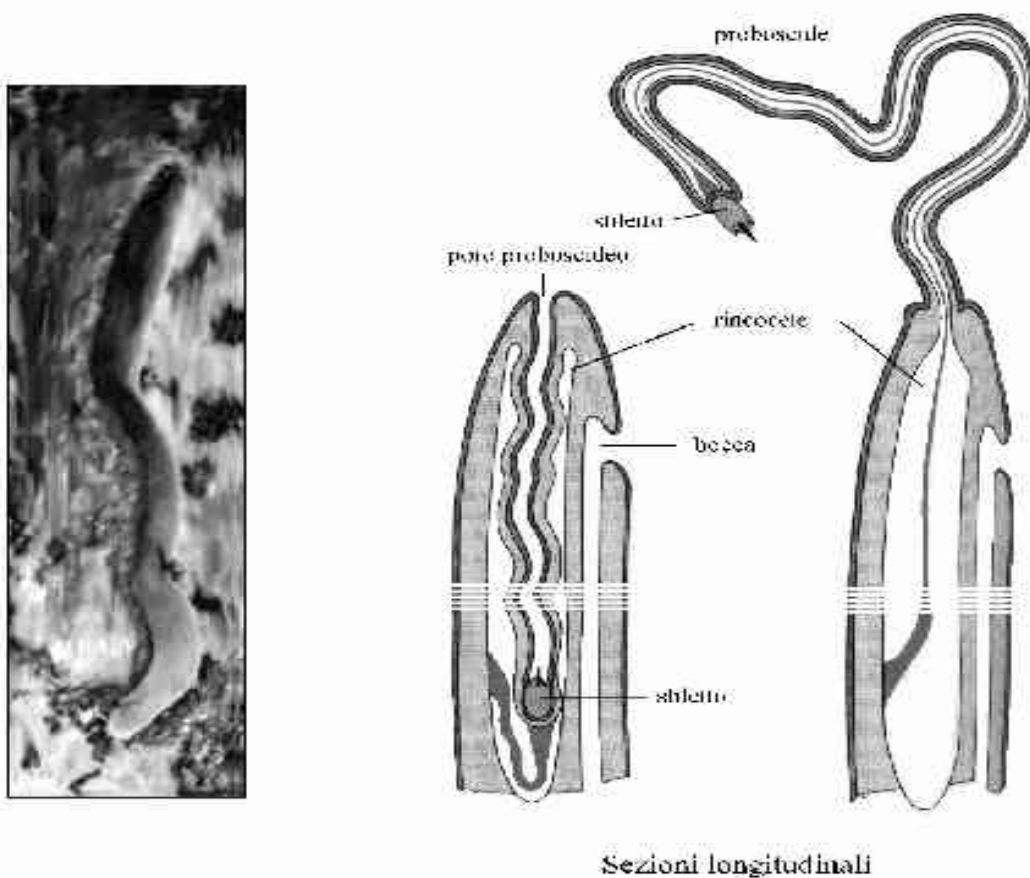


Fig. 62 – Un nemertino con il disegno della sezione antero-longitudinale, in cui è osservabile la proboscide retracts nel rincocete ed estroflessa.

Le specie di nemertini (o nemertei o rincoceli) viventi nel terreno umido sono costituite da vermi piatti o nastriformi, allungati e di lunghezza variabile da qualche millimetro fino a 2 m. Sotto l'aspetto alimentare, essi sono dei predatori e per afferrare la preda utilizzano la proboscide che può essere estroflessa rapidamente. La proboscide quando è completamente retratta si trova all'interno del verme dove è tenuta nel rincocelo ad opera di muscoli retrattori. L'estroflessione, per la cattura della preda, avviene quando la contrazione dei muscoli della parete del corpo aumenta la pressione idrostatica nel rincocelo. La preda, perforata dallo stiletto, è avvolta dalla proboscide, dopo che i muscoli retrattori retraggono la proboscide nel rincocelo. La preda viene quindi portata alla bocca ed ingerita.

Il gruppo più importante di nemertini viventi nei terreni umidi è il genere *Geonemertes* (*G. dendyi*) che cattura piccoli invertebrati ed è provvisto di un canale alimentare completo e di un apparato circolatorio (figura 62).

Nematoda

Il *phylum Nematoda* è uno dei nove *phyla* appartenenti ai metazoi pseudocelomati. Questo gruppo di metazoi è così chiamato perché gli animali che vi appartengono sono provvisti di uno *pseudoceloma* o *pseudocoele*, pieno di liquido circondante un canale alimentare completo. Conseguentemente, questi animali hanno un'architettura corporea costituita da un tubo all'interno di un altro tubo. Gli organi interni non sono sospesi alla parete del corpo, ma sono liberi nello pseudocoele. La cuticola, situata all'interno dell'epidermide, riveste la parete del corpo (figura 63).

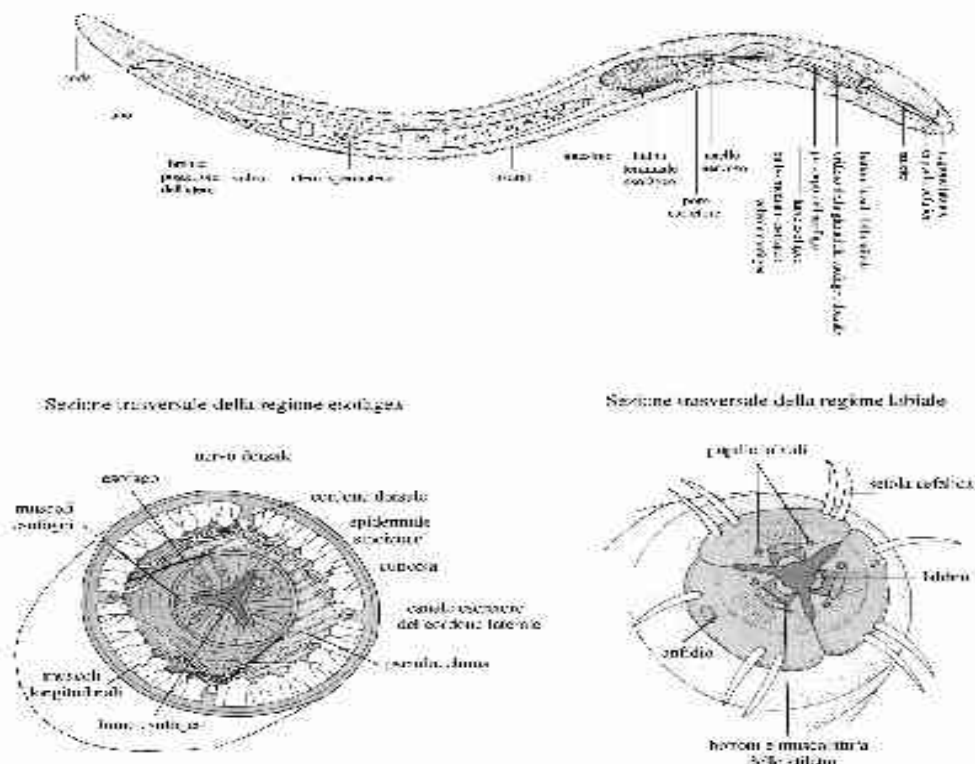


Fig. 63 – Sezioni schematiche longitudinale e trasversali di un nematode fitoparassita.

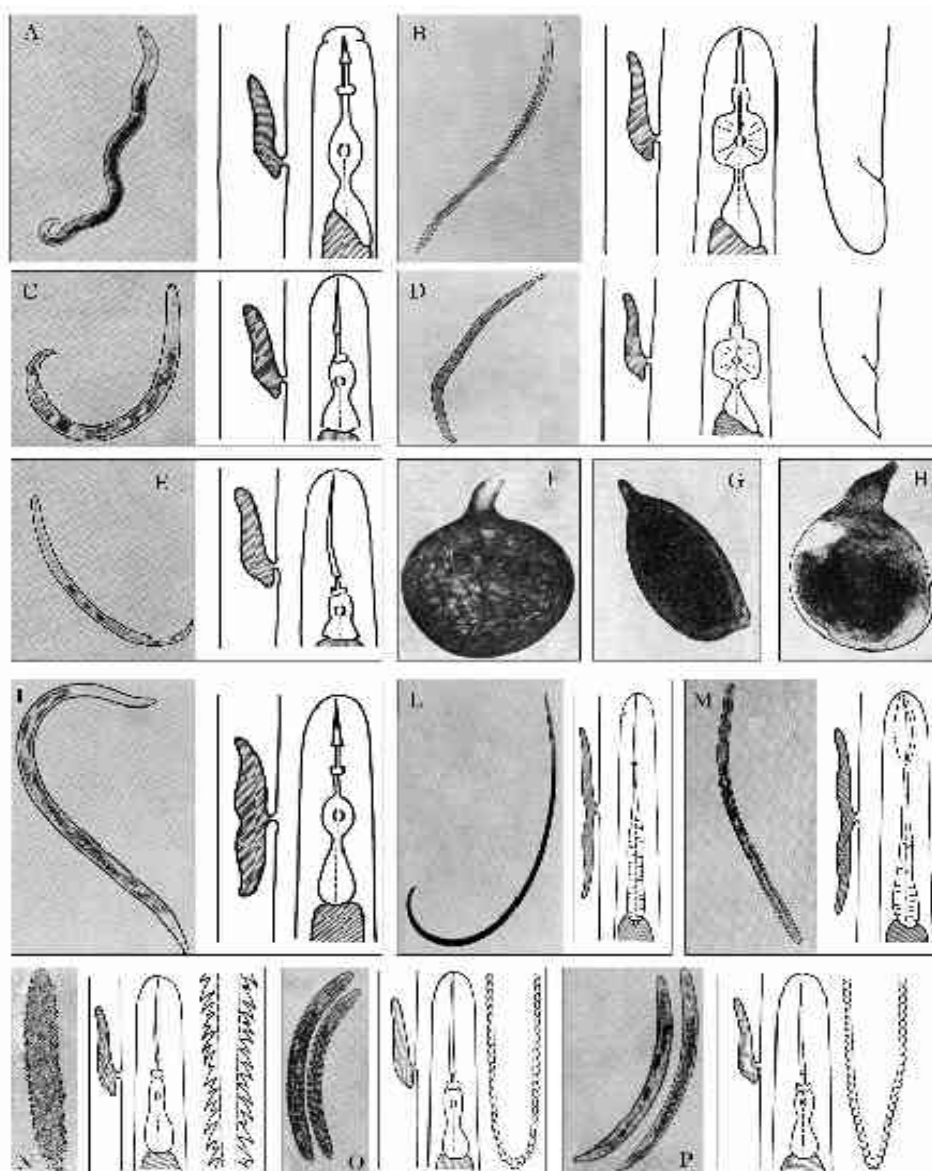


Fig. 64 – Microfotografie e schemi di sezioni longitudinali di alcuni generi di nematodi fitoparassiti. A: femmina di *Pratylenchus* viva in acqua e disegno dell'ovario (singolo) e dell'estremità anteriore. B: femmina di *Aphelenchus* e disegno dell'ovario (singolo) e dell'estremità anteriore e posteriore. C: femmina di *Paratylenchus* e disegno dell'ovario (singolo) e dell'estremità anteriore. D: femmina di *Aphelenchoides*, con disegno dell'ovario e delle estremità anteriore e posteriore. E: femmina di *Gracilacus* e disegno dell'ovario e dell'estremità anteriore. F: cisti (corpo maturo della femmina) di *Globodera rostochiensis*. G: cisti di *Heterodera schachtii*. H: femmina matura di *Meloidogyne*. I: femmina viva in acqua di *Tylenchorynchus* e disegno dell'ovario (doppio) e dell'estremità anteriore. L: femmina di *Xiphinema* con ovario doppio ed estremità anteriore. M: femmina di *Trichodorus* con disegno dell'ovario (doppio) e dell'estremità anteriore. N: femmina di *Criconema* con ovario singolo, estremità anteriore e particolare della cuticola. O: esemplari di *Criconemoides* con ovario singolo, estremità anteriore ed estremità posteriore con la cuticola anulata. P: esemplari di *Hemicriconemoides* con schema dell'ovario (singolo), dell'estremità anteriore e posteriore, con il particolare in quest'ultima, dell'anulazione della cuticola (da Scognamiglio e Talamé, 1971).

I nematodi presentano forme del corpo sorprendentemente uniformi e ciò rappresenta una misura della grande adattabilità evolutiva di uno stesso piano architettonico fondamentale. Il corpo dei nematodi che si trovano nel terreno è cilindrico, si assottiglia verso un punto all'estremità posteriore, ha un'estremità anteriore smussata con una bocca all'apice ed ha dimensioni variabili tra 0,5 e 2 mm. Brevi setole sensoriali e parti boccali circondano la bocca. Il canale alimentare è rettilineo e privo di muscolatura tranne che nella faringe. La parete del corpo è rivestita da una cuticola, ha soltanto muscoli longitudinali e l'interno, nello pseudoceloma, contiene un liquido ad alta pressione. Ampie ricerche sono state dedicate ai nematodi parassiti dell'uomo, degli animali e delle piante. Le specie conducenti vita libera sono molto più numerose, spesso benefiche ma non sono state studiate altrettanto bene. I nematodi predatori vivono a spese di molti organismi del suolo e principalmente di protozoi e di altri nematodi. Molti nematodi sono saprofagi e possono svilupparsi a spese della materia organica in decomposizione e dei residui dei vegetali. Altri sono definiti micotrofici perché si alimentano di microfunghi (ife e spore fungine), ma anche di actinomiceti e di alghe, oltre che di mucillagini e di masse batteriche contenute nella materia organica. La specificità nutrizionale dei nematodi è spesso evidente. Il nematode *Aphelenchus avenae* si sviluppa bene in colture fungine di *Fusarium*, *Rhizoctonia*, *Verticillium* ma non di *Aspergillus*, *Penicillium*, *Rhizopus*, *Trichoderma*. Va anche ricordato che i primi funghi sono patogeni delle piante, mentre quelli del secondo gruppo non lo sono. Questo nematode tende a competere con i funghi dannosi alle coltivazioni ed a preservare quelli che fanno parte degli equilibri naturali della pedomicroflora. Specie di nematodi micofaghe sono attratte da colture fungine, ma non da actinomiceti e da batteri. Se i nematodi possono predare e nutrirsi a spese di molti microrganismi del suolo, essi sono a loro volta preda od oggetto di nutrimento di un numero altrettanto elevato di microrganismi. Alcuni mixobatteri del terreno uccidono alcune specie di nematodi batteriotrofici ed elaborano un complesso enzimatico in grado di degradare le spoglie degli stessi nematodi. Ma i fatti più sorprendenti si riscontrano ad opera dei funghi predatori di nematodi che hanno un meccanismo d'attacco che può essere di due tipi.

Il primo, di tipo endozoico, consiste nel fatto che il fungo penetra nell'animale, si nutre, lo uccide e poi emette fruttificazioni dal cadavere dell'ospite, da cui i conidi si diffondono per andare a parassitizzare altri nematodi. Un meccanismo di questo tipo è messo in atto dai funghi del genere *Acrostalagmus*, *Harposporium*, *Verticillium*, *Humicola* e *Cichlonema*. Il secondo, di tipo esozoico, consiste nell'avvolgimento del nematode nelle ife fungine le quali spesso formano un vero e proprio cappio in cui l'animale rimane stritolato. Il fungo *Arthrobotrys anchonia* cattura, secondo tale modalità, i nematodi rhabditoidi che incappano nelle ife le quali formano una trappola che si stringe, mentre il nematode tenta di strisciare attraverso di essa. Poi i filamenti fungini penetrano nel verme catturato e lo digeriscono (figura 65).

I funghi endozoici sono parassiti obbligati ed è molto difficile poterli allevare *in vitro*. Quelli esozoici sono facilmente coltivabili, ma non presentano *in vitro* l'habitus dei funghi predatori per la mancanza, probabilmente, di un complesso proteico secreto dallo stesso nematode e contenente una frazione, denominata *nemina*, indispensabile come fattore attivo nella formazione di spire e cerchi ifali per la cattura dell'animale. Questi organismi fungini potrebbero essere meglio studiati in micologia applicata ed utilizzati in metodi di controllo biologico per la lotta ai nematodi dannosi alle piante. I metodi di lotta biologica sono sicuramente più economici e meno pericolosi dei nematocidi fumiganti.

I nematodi possono ben prosperare nel terreno e molte specie hanno evoluto uova resistenti alla siccità. Alcuni possono perdere tutta l'umidità del corpo e sopravvivere, diventando dormienti quando l'ambiente si essicca. I terreni ricchi di sostanza organica

contengono miliardi di nematodi viventi nei primi 5-10 cm superiori. I nematodi svolgono un'attività di spazzini e possono far aumentare drasticamente la velocità di decomposizione della sostanza organica.

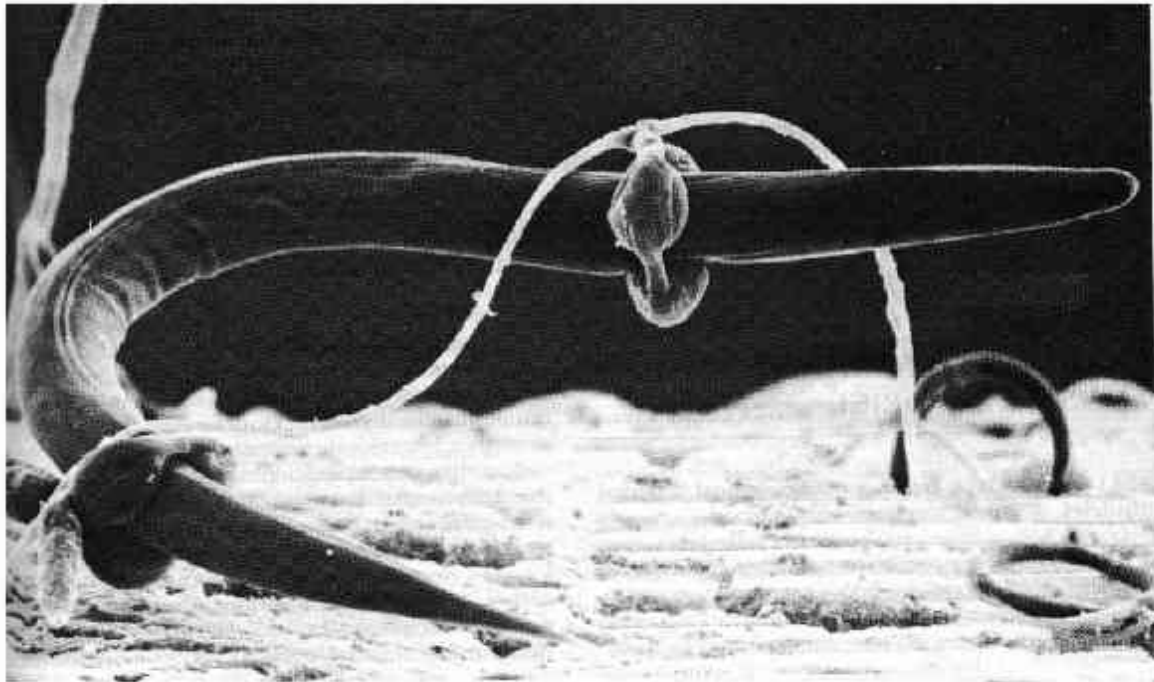


Fig. 65 – Un nematode del terreno predato da un fungo visto al microscopio elettronico a scansione. Le ife fungine costituiscono cappi che immobilizzano il nematode per poi penetrare, mediante gli austeri, nella vittima che viene, in tal guisa, digerita (da Mitchell *et al.*, 1999).

Rotifera

I rotiferi rappresentano un phylum di pseudocelomati costituito da circa 1800 specie note, di cui meno del 10% prosperano nel terreno umido ed in particolare nelle goccioline d'acqua che riempiono i pori del suolo o che condensano sui muschi. Le dimensioni di questi animali non superano 1 mm di lunghezza e, per le loro dimensioni e per i movimenti, assomigliano ai protozoi ciliati. La maggior parte dei rotiferi si muove attivamente sui substrati alla ricerca di cibo.

I rotiferi hanno parecchi caratteri distintivi. Nella maggior parte di loro, una *corona* anteriore di ciglia sembra ruotare continuamente e funziona nel nuoto nella fase liquida del terreno e nell'alimentazione. I primi microscopisti chiamarono questi animali rotiferi (letteralmente “portatori di ruote”) proprio per la somiglianza della corona con una coppia di ruote in rotazione su se stesse. La faringe, posta dietro la corona, è differenziata in una struttura mascelliforme detta *mastax* o *ventriglio*. Il corpo dei rotiferi, a differenza di quello dei nematodi, è rivestito da una cuticola formata all'interno di un'epidermide sinciziale. In molte specie la cuticola è tanto ispessita da formare una *lorica*. Una rappresentazione schematica dell'anatomia dei rotiferi, utile per il loro riconoscimento, è riportata nella figura 66.

Il corpo dei rotiferi è formato da un numero relativamente costante di cellule somatiche, oscillante intorno a 800-1.000. La caratteristica di mantenere costante il numero delle cellule corporee si chiama *eutelia*. Molte specie hanno un piede assottigliato verso l'estremità e terminante con dita mobili e ghiandole pedali che

secernono adesivi, facilitando la locomozione e l'attacco ai substrati.

Le specie viventi nel terreno si muovono alla maniera dei bruchi dei lepidotteri geometridi, per cui, con le dita incollate al substrato, un rotifero protende il corpo in avanti, si attacca in corrispondenza della sua estremità anteriore e poi libera il piede.

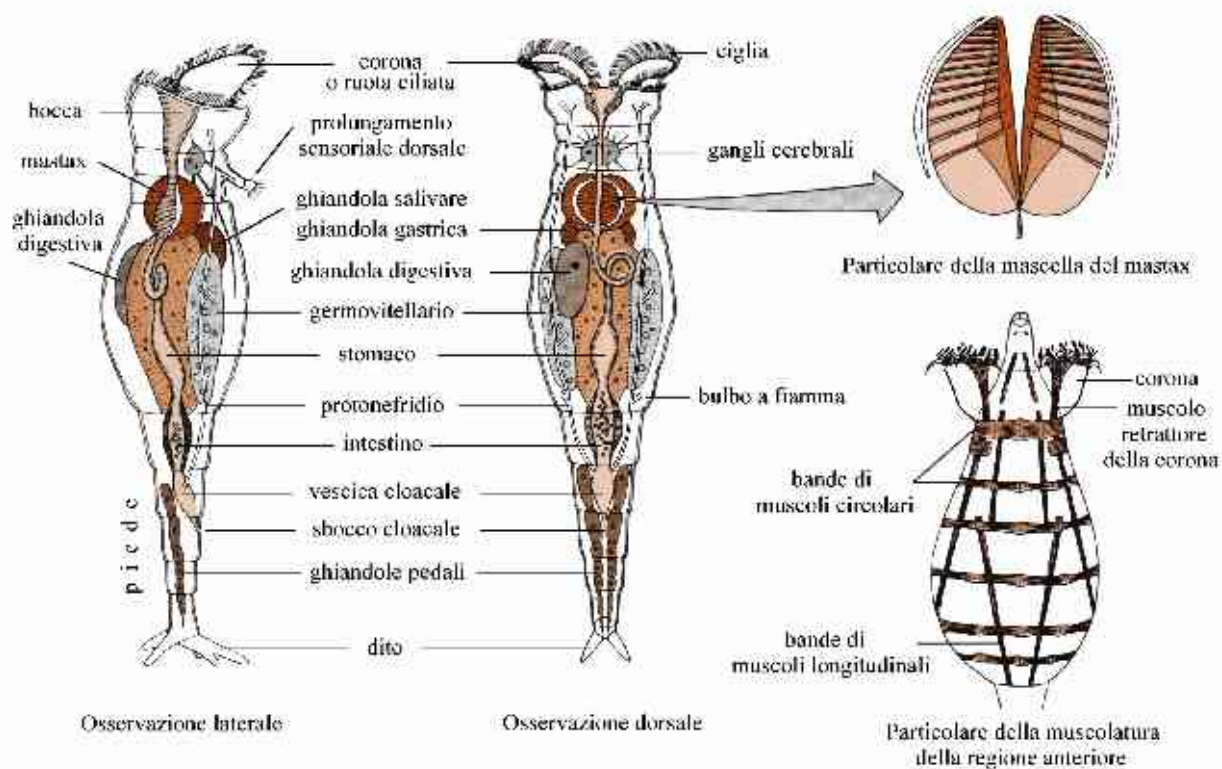


Fig. 66 – Osservazione laterale e dorsale, con particolari del mastax e della regione anteriore del corpo, dei rotiferi. La bocca, con la potente muscolatura, ed il mastax, con le due lamine provviste di creste, fa di questi animali degli efficienti predatori, in grado di tritare il cibo. Il corpo è anulato esternamente ed è dotato d'un piede provvisto di unità cuticolari che possono essere retratte ed estroflesse a cannocchiale (da Mitchell *et al.*, 1999)

Molti rotiferi si alimentano di particelle organiche poste sulle superfici o sono attivi predatori di protozoi e metazoi microscopici, compresi altri rotiferi. Il canale alimentare dei rotiferi è formato da una bocca circondata da una corona, una faringe, un esofago, uno stomaco sacciforme, un breve intestino ed un ano dorsale. Ghiandole salivari e gastriche secernono enzimi nella faringe e nello stomaco dove avviene la digestione, la triturazione e la degradazione del materiale ingerito. Le strutture della corona e del mastax rispecchiano le abitudini alimentari dei rotiferi e sono utili nella classificazione.

I rotiferi, come gli altri pseudocelomati, scambiano gas ed eliminano prodotti di rifiuto azotati per diffusione attraverso le superfici del corpo. Amebociti e liquidi pseudocelomatici, mossi dalle contrazioni muscolari, facilitano la circolazione.

Quasi tutti i rotiferi che si osservano nel terreno sono femmine, mentre i maschi sono presenti soltanto per brevi periodi, verso la fine di una stagione d'accrescimento ed, in molte specie, non esistono per niente e, pertanto, lo sviluppo avviene per partenogenesi, vale a dire gli individui si sviluppano da uova non fecondate (figura 67).

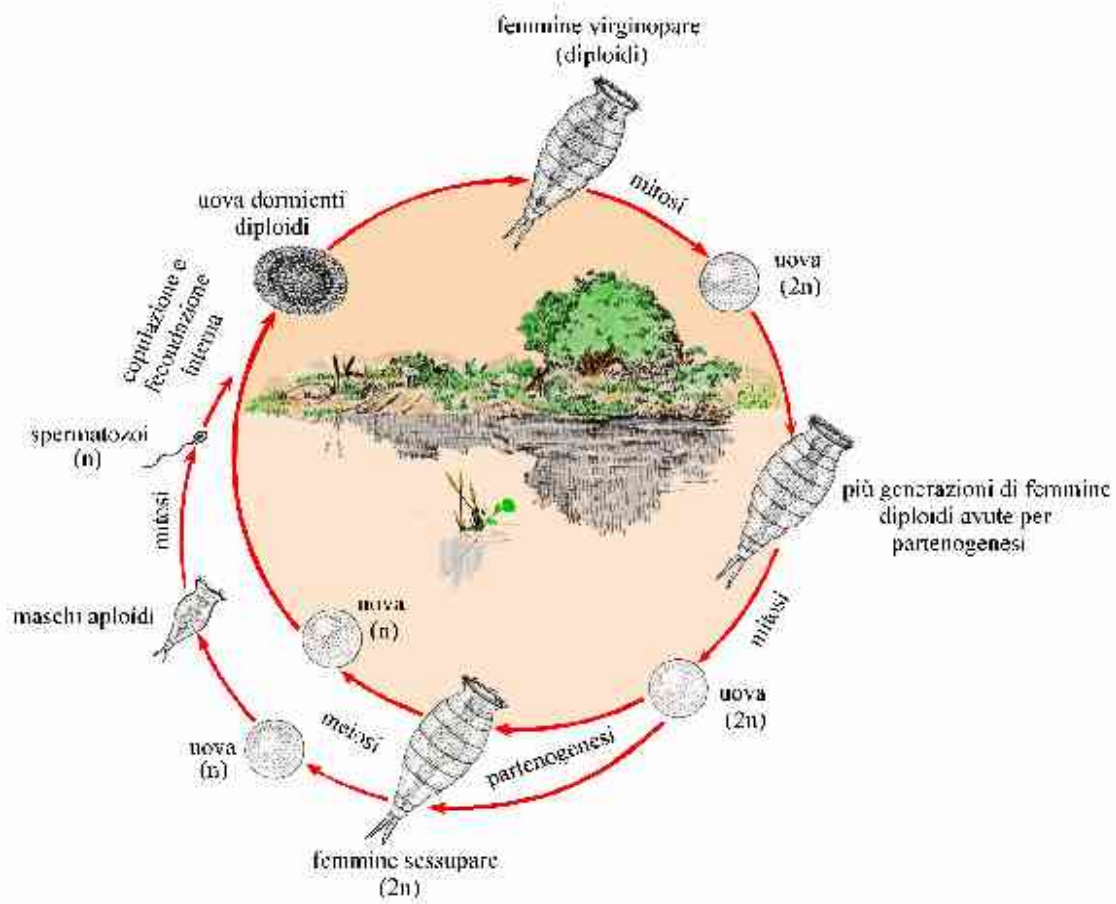


Figura 67 – In un ecosistema naturale, il ciclo biologico dei rotiferi si svolge per partenogenesi (ad opera di femmine virginopare) e per copulazione e fecondazione interna (per mezzo di femmine sessupare). Nel terreno si osservano principalmente femmine virginopare ed uova diploidi dormienti o in uno stadio criptobiotico.

I rotiferi terricoli hanno tipicamente uova dormienti resistenti alla siccità ed alcune specie sono capaci di sopravvivere a periodi prolungati di disseccamento.

A tal proposito bisogna ricordare che molti nematodi, rotiferi e tardigradi, ad habitat terricolo, hanno la capacità di sopravvivere in uno stato di morte apparente temporanea per decenni e persino secoli. Il fenomeno è indicato, si ricorda, col nome di *criptobiosi*.

Gli animali criptobiotici sono fortemente disidratati ed il loro metabolismo è talmente basso, o può completamente arrestarsi, da sollevare la questione di come lo stato di criptobiosi possa essere distinto dalla morte.

Durante la criptobiosi gli animali divengono più piccoli e leggeri e possono essere dispersi dal vento in nuovi ambienti.

La criptobiosi sembra sia in relazione alla presenza di due sostanze, il glicerolo ed il trealosio, che sono in grado di proteggere i tessuti essiccati contro l'ossidazione (il primo) e di funzionare come distanziatore inerte tra molecole proteiche fragili, impedendone la degradazione quando si verifica la reidratazione ed evitando la fusione tra loro delle membrane essiccate (il secondo).

Un nematode, un rotifero, un tardigrado per entrare in criptobiosi deve essiccarsi molto

lentamente e quando incomincia la gran siccità, gli animali si aggregano in gruppi compatti oppure assumono determinate posture.

Le superfici irregolari, come le particelle di un terreno sabbioso, dove le sacche d'acqua evaporano lentamente, sono ideali per una lenta essiccazione.

I rotiferi riducono la superficie corporea esposta assumendo una forma ovoidale, rallentando la velocità d'essiccazione ed assicurando il tempo necessario per la sintesi di glicerolo e trealosio.

La capacità di sopravvivere in uno stato disidratato rappresenta un enorme vantaggio adattativo per gli animali che vivono nell'acqua del terreno che secca ad intervalli di tempo.

I nematodi, i rotiferi e, come si vedrà, i tardigradi sono tutti animali acquatici aventi bisogno d'acqua libera per avere una vita attiva normale. Attraverso la criptobiosi essi sono capaci di vivere permanentemente in molti ambienti che altrimenti sarebbero mortali.

Gastrotricha

I gastrotrichi somigliano lievemente ai rotiferi, di cui hanno le stesse dimensioni, perché presentano una lunghezza quasi sempre inferiore al millimetro.

I gastrotrichi si differenziano dai rotiferi perché la superficie del corpo è provvista di scaglie o spine, non presentano la corona anteriore di ciglia, la superficie ventrale è dotata di ciglia locomotorie, la cuticola è extracellulare più simile a quella dei nematodi che non a quella dei rotiferi, spesso hanno una coda forcuta con ghiandole adesive, lo pseudoceloma è molto ridotto o assente (figura 68).

I gastrotrichi annoverano circa 450 specie descritte, ma probabilmente molte altre ne restano da scoprire.

Alcune specie abitano il terreno umido e si alimentano di detriti organici, batteri, alghe, protozoi, amebe, nematodi, anellidi e piccoli artropodi. Le ciglia e le spine che circondano la bocca trattengono le particelle alimentari, mentre la faringe, mediante la potente muscolatura, crea una depressione e la forza aspirante che ne deriva aiuta a convogliare l'alimento nell'intestino.

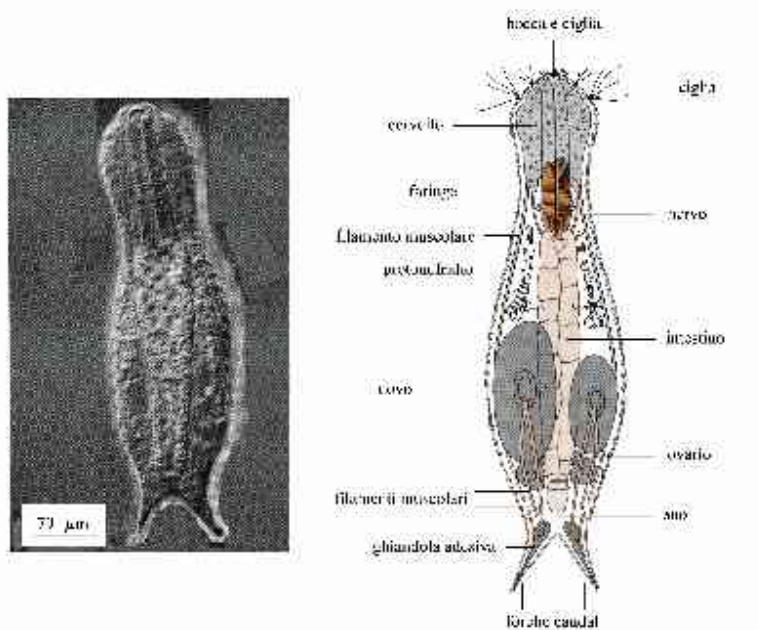


Fig. 68 – Aspetto esteriore ed anatomia interna dorsale di un tipico gastrotrico (da Mitchell *et al.*, 1999).

Mollusca

Il phylum *Mollusca* comprende circa 110.000 specie e costituisce il secondo phylum, in ordine di grandezza, nel regno animale. Moltissime specie sono terrestri ed appartengono alla classe *Gastropoda*, una delle sette classi comprendente circa il 60% delle specie conosciute. Il termine molluschi deriva dal latino *mollis*, per le varie parti del corpo molli, sebbene molti di essi abbiano una conchiglia dura (figura 69).



Fig. 69 – Conchiglie di molluschi della classe *Gastropoda* (da Mitchell *et al.*, 1999).

La maggior parte degli organi è posta in una massa corporea detta massa viscerale, in posizione ventrale rispetto ad un *piede* muscoloso usato nella locomozione.

La maggior parte dei molluschi ha un capo ed un organo d'alimentazione provvisto di dentelli, simile ad una lingua, detto *radula*, avente la funzione di raspare la sostanza organica dalle superfici rocciose e terrose. I

l piede ed il capo sono coperti dorsalmente da un'estensione della massa viscerale, detta *mantello* o *pallio*, al disotto del quale esiste una *cavità palleale*.

Il mantello riproduce la *conchiglia* calcarea, attaccata al margine esterno del mantello, e funziona negli scambi gassosi, nell'escrezione e nella recezione sensoriale.

Molti molluschi gasteropodi sono utili perché eduli per l'uomo, ma arrecano anche danni più o meno gravi alle piante.

Si ritiene interessante, ai fini del riconoscimento specifico, riportare alcune di queste specie nella figura 70.

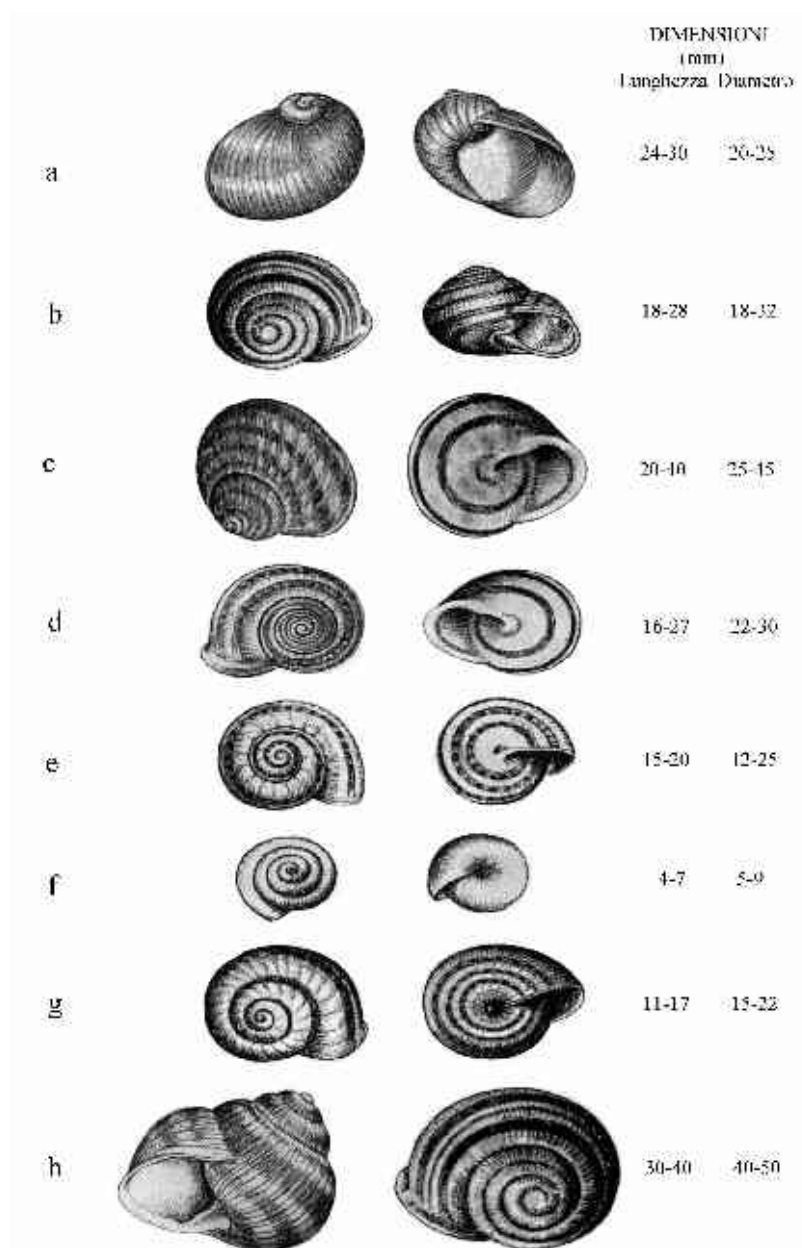


Fig. 70 – Conchiglie di alcune specie di chioccioline che possono ritrovarsi nei nostri terreni e fra la vegetazione: a) *Canthareus aperta* che vive nei vigneti e nei campi coltivati, soprattutto dove la terra è mossa, molto stimata per la sua commestibilità; b) *Cepae nemoralis*, specie polimorfa unicolore o con alcune fasce distinte o saldate, molto diffusa nei boschi e nei giardini; c) *Cryptomphalus aspersus*, con conchiglia sottile, solida, opaca, conoide e ventricosa e formata da 4-5 giri molto convessi dei quali l'ultimo è molto grande; d) *Eobania vermiculata*, comune nei campi e sui muri, con conchiglia sub-depressa, spessa, solida, bianco grigiastro o giallastro, unicolore o con 4-5 fasce libere o saldate; e) *Euparypha pisana*, comune nei campi e lungo le siepi, xerofila, con conchiglia globosa, solida e sottile ed elica di 5-6 giri, di colore rosa o gialliccia; f) *Helicella pyramidata*, di piccole dimensioni, che può arrecare, se presente in elevato numero, sensibili danni alle piante; g) *Helicella variabilis*, specie xerofila, di piccole dimensioni; h) *Helicogena lucorum*, di grandi dimensioni, con conchiglia globosa a 5-6 giri molto convessi, di colore bruno-rossastro o giallognolo, con 2-5 fasce brune ed intercalate da strisce biancastre.

Altri gasteropodi sono sprovvisti di conchiglia (limacce). Fra questi ultimi si ricordano i generi *Arion*, *Limax*, *Agriolimax*, i quali comprendono specie dannose agli orti ed ai giardini, *Milax* (molluschi onnivori che divorano vegetali, ma anche insetti morti ed altri molluschi ai quali danno una caccia attiva, rendendosi, così, ausiliari dell'agricoltore nel controllo dei nemici delle coltivazioni), *Ariolimax*, in grado di raggiungere dimensioni di 10-12 cm (figura 71).



Fig. 71 – Le limacce sono gasteropodi polmonati che, a differenza delle chiocchie, sono sprovvisti di conchiglia, forse come adattamento evolutivo alla vita in territori poveri di sali di calcio, indispensabili per la costituzione del loro organo di protezione. Le loro dimensioni sono di 30-70 mm (*Agriolimax agrestis*), 90-200 mm (*Limax cinereo-niger*), 150-180 mm (*Limax maximus*). Nella foto, un esemplare di *Ariolimax columbianus* fotografato sulla costa dell'Oregon, lungo 10-12 cm (da Mitchell *et al.*, 1999).

Parecchie specie della classe *Bivalvia* scavano gallerie nella roccia e nel legno. I bivalvi che perforano le rocce sono provvisti di una conchiglia dentellata e, mentre il piede si tiene fisso ad una superficie rocciosa, il margine dentellato scorre avanti ed indietro su di essa abradowando gradualmente la roccia.

Sono note circa 24.000 specie di gasteropodi terrestri (chiocchie e lumache), per i quali l'acqua è il fattore limitante più importante, anche se molti possono vivere tranquillamente in ambienti molto siccitosi ed hanno adattamenti fisiologici e comportamentali specializzati per la conservazione dell'acqua.

Le chiocchie terrestri sono capaci di sopravvivere a periodi di siccità estrema retraendosi nella conchiglia e diventando inattive e riducendo la velocità metabolica.

Le lumache, prive di conchiglia, hanno una cute mucillaginosa e sono attive soltanto quando l'atmosfera è umida. Nelle giornate secche rimangono sotto le foglie o

sotto la lettiera umida, spesso contratte in una sfera compatta per ridurre la perdita d'acqua.

Il non avere una conchiglia conferisce alcuni vantaggi adattativi, come la possibilità di vivere in ambienti poveri di calcio e la capacità di trovare più facilmente ricoveri naturali, potendo penetrare in piccoli fori e fessure.

Le lumache, rispetto alle chiocchie, sono capaci di sopravvivere ad una maggiore perdita d'acqua corporea e sono capaci di sottrarre umidità all'atmosfera ricostituendo in poche ore oltre il 25% della massa corporea perduta in condizioni estreme d'aridità.

La radula consente un'alimentazione basata sul raschiamento delle parti solide del terreno, asportazione di batteri e alghe e loro convogliamento nella parte posteriore della bocca.

I gasteropodi, in particolare, sono onnivori, essendo raschiatori o brucatori d'alghe ed integrando la dieta con sostanza vegetale od animale morta.

Un adattamento dei gasteropodi per la digestione del materiale vegetale è dato da uno stomaco o ventriglio tritatore, muscoloso, contenente granelli di sabbia abrasivi ed in grado di elaborare enzimi cellulolitici capaci di degradare completamente la sostanza vegetale.

Annelida

Il phylum *Annelida* è costituito da individui caratterizzati da metameria, vale a dire un'ulteriore evoluzione filogenetica consistente nella suddivisione del corpo, secondo la lunghezza, in una serie di metameri e tipica d'altri due gruppi animali, d'ulteriore complessità, gli artropodi ed i cordati.

Esistono circa 15.000 specie di anellidi, ripartite in quattro classi, di cui le più importanti, sotto il profilo pedologico, sono la classe *Polychaeta* ed, in particolare, la classe *Oligochaeta*.

Gli anellidi o vermi segmentati o vermi metamerici hanno un celoma spazioso, una parete del corpo pluristratificata, con una cuticola esterna secreta da un'epidermide sottostante e con strati di muscoli circolari e longitudinali (figura 72).

Gli anellidi presentano diversità nelle abitudini, nell'aspetto e nella grandezza. Le loro dimensioni vanno da quelle microscopiche ad una lunghezza d'alcuni metri.

La distinzione tra i policheti e gli oligocheti sta nel numero di setole, come dice il nome.

I primi hanno molte setole sporgenti da appendici segmentali pari, dette *parapodi*, che facilitano la locomozione, mentre i secondi hanno setole relativamente poche ed incospicue, sono privi di parapodi, hanno un capo ridotto e privo di appendici.

Il tipico rappresentante degli oligocheti è il *Lumbricus terrestris*, il comune lombrico, con il corpo lungo da pochi centimetri fino a 30 cm, suddiviso in più di 100 metameri chiaramente distinguibili.

Il lombrico è abbondante in molti terreni europei ed è stato introdotto massicciamente in altre parti del mondo. Va anche detto che il lombrico non è sempre la specie più comune, anzi, in alcune località è più raro di quanto si possa supporre.

Infatti, la specie *Allolobophora terrestris* f. *longa*, che è un tipo confrontabile con il comune lombrico, può spesso essere il più diffuso.

Inoltre, in Inghilterra, *Allolobophora caliginosa* è probabilmente il più diffuso ed il verme più ampiamente distribuito.

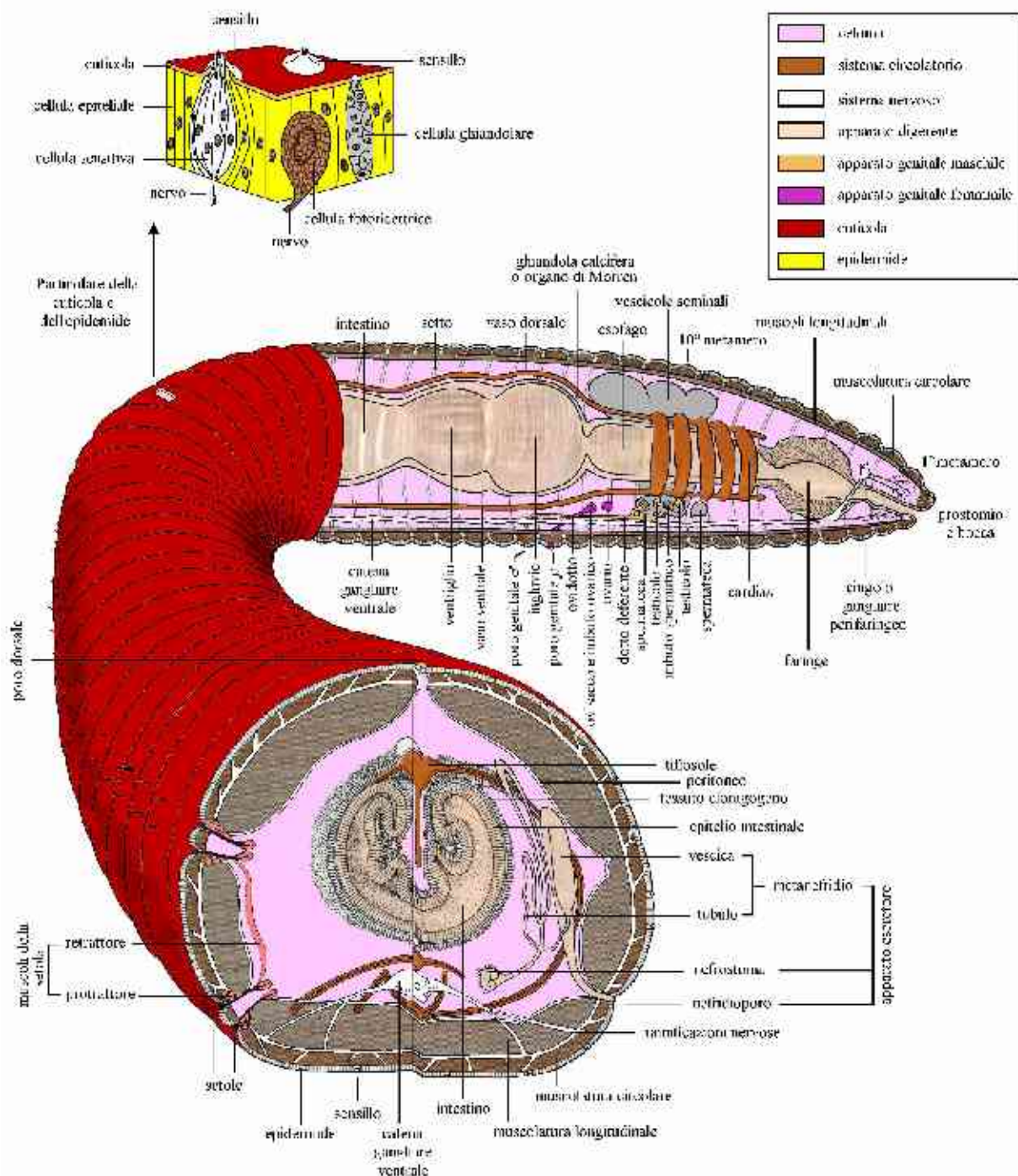


Fig. 72 – Schema dell'anatomia di un lombrico. Il robusto e muscoloso apparato digerente, con le varie dilatazioni per l'immagazzinamento temporaneo del cibo, è in grado di ingerire e digerire grandi quantità di terreno e di migliorarlo da un punto di vista agronomico. Le ghiandole calcifere hanno il compito di eliminare dall'emolinfa il calcio in eccesso, secernendolo nell'esofago come cristalli di carbonato di calcio. Da un punto di vista della riproduzione i lombrichi sono ermafroditi, possedendo essi sia l'apparato genitale maschile sia quello femminile. La discendenza, tuttavia, deriva quasi sempre dall'accoppiamento tra due individui. Il particolare dell'epidermide mostra cellule fotorecettive (incapaci di formare immagini, ma in grado di attrarre il lombrico verso la luce debole e di indurre la repulsione dalla luce intensa), sensilli chemiorecettori e cellule ghiandolari.

I diversi tipi di vermi non hanno abitudini identiche ed analoghe preferenze, così che specie comuni in una località possono essere assenti in altre. Oltre quelle citate, si possono ricordare anche altre specie, come *Lumbricus rubellus*, *Octolasion lacteum*.

Gli oligocheti o lombrichi o vermi di terra sono frequentemente abbondanti nel terreno umido non acido, ricco di sostanza organica e la loro azione è utile nel condizionamento del terreno e migliora notevolmente l'accrescimento delle piante.

La distribuzione degli oligocheti è influenzata dal valore alimentare, dal contenuto d'acqua e dalla reazione del terreno. Dense popolazioni di lombrichi si possono trovare solo in terreni contenenti grandi quantità di sostanza organica e di humus in particolare. Il contenuto d'acqua non deve essere eccessivo, poiché un terreno saturo d'acqua riduce la captazione dell'ossigeno, causa asfissia e costringe i vermi a salire in superficie.

La reazione anomala del terreno crea anch'essa problemi respiratori agli oligocheti poiché un terreno acido ha generalmente un basso contenuto in calcio. Quest'elemento serve a ridurre la concentrazione d'anidride carbonica nell'aria tellurica e quindi a facilitare la liberazione della CO₂ respiratoria. Il terreno è capace di sostenere la vita di grandi masse di lombrichi, fino ad oltre 120 g di massa corporea per metro quadrato. La vasta azione di scavo per opera dei lombrichi, fino a profondità di parecchi metri per l'attività di specie più grandi come *L. terrestris*, induce aerazione nel terreno e ne migliora il drenaggio e la fertilità. Molti lombrichi trasportano il terreno ingerito in superficie, defecandolo sotto forma di deiezioni ricche di sostanze nutritive e di elementi minerali essenziali per la nutrizione delle piante. La presenza di popolazioni di oligocheti nel terreno influisce sulle caratteristiche morfologiche delle particelle umiche a seguito dell'intensa azione di triturazione dei detriti organici e conferisce il caratteristico aspetto grumoso e stabilità strutturale.

Un aspetto interessante è l'appetibilità del materiale organico da parte degli oligocheti ed in particolare di *L. terrestris*. La sequenza degli eventi riguardanti la decomposizione, dal momento in cui il materiale vegetale più o meno fresco raggiunge il terreno, varia notevolmente ed ancora non è ben conosciuta. I residui delle coltivazioni non sono aggrediti immediatamente dalla fauna del suolo, ma sono prima invase dai microrganismi batterici e fungini principalmente. Durante questo periodo i residui vegetali diventano scuri, si alterano e si creano sostanze solubili in acqua (soprattutto zuccheri, acidi organici, polifenoli) che poi sono liscivate via. Orbene, il materiale organico meno scuro, per la minor presenza di zuccheri e polifenoli, è aggredito molto più rapidamente dai lombrichi e dagli altri animali della lettiera. La materia organica che subisce la lisciviazione da parte dell'acqua, quindi la purificazione dai fenoli, viene altrettanto rapidamente degradata dai lombrichi, dimostrando con ciò che queste sostanze riducono l'attrazione per il pabulum in questi animali.

I lombrichi svolgono un'azione molto favorevole sull'intensità delle complesse reazioni di combinazione tra materiale umico e componenti minerali. Tali reazioni producono quello che si chiama *humus mull*, molto meno acido di quell'*humus* non combinato con composti minerali (*humus mor*). L'azione dei lombrichi, insieme con quella della restante pedofauna, permette una completa umificazione dei residui organici del mull, mentre nel mor, la sola azione dei microrganismi vegetali ed il basso contenuto di cationi, come il magnesio, calcio, sodio e potassio, tipici di un ambiente a reazione acida, non sono in grado di determinare un adeguato andamento del processo d'umificazione.

Caratteristico è il tubo digerente del lombrico. Presenta una faringe robusta e muscolosa, cui segue una prima dilatazione detta proventricolo o ingluvie o gozzo ed una seconda detta ventricolo o ventriglio o stomaco trituratore. Mentre il lombrico scava la

galleria nel suolo, la potente faringe, coadiuvata dal prostomio linguiforme, posto sopra la bocca, convoglia terra e sostanza organica nell'esofago. L'alimento passa dall'esofago al proventricolo (un organo d'immagazzinamento dell'alimento) e poi al ventriglio, dove è finemente triturato. Dopo il trattamento meccanico e fisico, l'alimento è spinto nell'intestino dove avviene la secrezione di enzimi e la digestione delle proteine, degli amidi, dei grassi e, forse, della cellulosa. Non è stato ancora chiaramente stabilito se i lombrichi secernono l'enzima cellulasi o se ricorrono ai microrganismi del tubo intestinale per la digestione della cellulosa. Le sostanze nutritive derivate dalla digestione sono assorbite nell'emolinfa e nel liquido della cavità celomatica e trasportate in tutto il corpo. La maggior parte di quello che un lombrico ingerisce è indigeribile e, mescolata con altri rifiuti, è espulsa attraverso l'apertura anale ed, in alcune specie, accumulata all'ingresso della galleria sotto forma di deiezioni. L'intestino del lombrico è un tipico esempio in cui i processi dipendenti dalla superficie, come la digestione e l'assorbimento, sono associati a superfici caratterizzate da aree molto estese. L'intestino del lombrico è lungo circa tre quarti la lunghezza dell'intero corpo ed è introflesso lungo il lato dorsale, dove forma una *tiflosole*, che aumenta ulteriormente la superficie.

I lombrichi, come tutti gli oligocheti, a differenza dei policheti, sono ermafroditi. L'accoppiamento avviene all'altezza del clitello (zona ghiandolare che interessa più metameri). In *Lumbricus*, gli orifizi genitali si trovano ad una certa distanza reciproca. Il verme usa le contrazioni muscolari per formare un solco ventrale dagli orifizi dei ricettacoli seminali di uno ai pori genitali maschili dell'altro. Dopo che ciascun verme ha deposto lo sperma nel solco, impulsi muscolari peristaltici spingono lo sperma lungo il canale convogliandolo nei ricettacoli seminali del partner. Il trasferimento degli spermatozoi richiede parecchie ore, poi avviene la separazione (figura 73).



Fig. 73 – Un gruppo di anellidi del genere *Lumbricus*, alcuni dei quali in fase di accoppiamento.

Piccoli anellidi oligocheti sono gli enchitreidi i quali utilizzano i resti vegetali ed animali che sono ingeriti e frammentati insieme a notevoli quantità di silice, realizzando una mescolanza omogenea di materiali organici e minerali. Essi rappresentano l'esempio concreto di come sia possibile ottenere quella serie complessa di reazioni che portano alla formazione di *humus mull*.

Arthropoda

Il *phylum* degli artropodi, con circa un milione di specie classificate, costituisce il più grande, vario e differenziato raggruppamento del regno animale.

Questi animali metamerici sono caratterizzati da un esoscheletro pluristratificato che protegge gli organi interni ed offre robuste inserzioni per i muscoli e sostegno per le appendici locomotorie. La cuticola è rinnovata ad intervalli regolari con il processo della muta, man mano che l'animale si accresce.

Altra importante caratteristica degli artropodi è che i metameri tendono a combinarsi in gruppi funzionali come il capo, il torace e l'addome, tipici, ad esempio, degli insetti. Le appendici degli artropodi sono articolate per mezzo di articolazioni a ginglino che permettono complessi movimenti delle zampe.

Gli artropodi possiedono, come cavità del corpo, un *emocele* o *emoceloma*, anziché il celoma metamerico tipico della maggior parte degli anellidi. Il *phylum* degli artropodi è distinto in quattro *subphyla*, tre viventi (*Chelicerata*, *Crustacea* ed *Uniramia*) ed uno estinto (*Trilobita*).

Il *subphylum Chelicerata*, la classe *Arachnida* nell'ambito di questo, riveste in certo interesse sotto il profilo pedologico. Sono note circa 65.000 specie di chelicerati, quasi tutti appartenenti alla classe degli aracnidi. Caratterizzano questo *subphylum* le prime due paia d'appendici, di cui il primo sono organi d'alimentazione detti *cheliceri*, mentre il secondo sono organi, oltre che d'alimentazione, anche sensoriali, detti *pedipalpi* o *palpi*. I chelicerati sono privi di antenne ed il loro corpo è distinto in due metameri funzionali, il *cefalotorace* o *prosoma*, recante i cheliceri ed i pedipalpi, e l'*addome* o *opistosoma*. Quasi tutti gli aracnidi sono terrestri e gli adulti hanno quattro paia di zampe ambulatorie (figura 74).

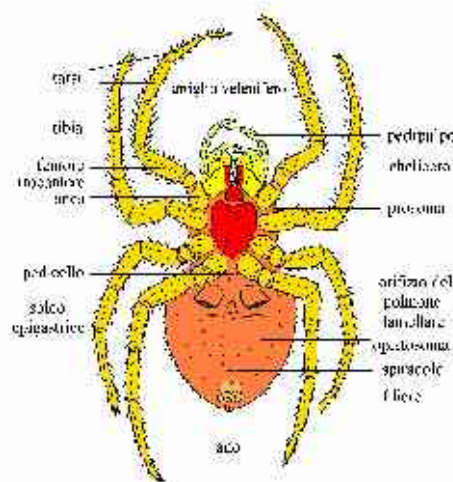


Fig. 74 – Rappresentazione ventrale schematica di un ragno adulto. Notare sull'addome le filiere che producono i fili per la costruzione della ragnatela, gli orifizi respiratori, tra cui lo spiracolo, (in comunicazione con le trachee) ed il solco epigastrico (associato all'apparato riproduttivo).

Alla classe degli aracnidi appartengono i seguenti ordini: *Scorpiones*, *Uropygi*, *Araneae*, *Pseudoscorpiones*, *Opiliones* ed *Acarina*. Di questi, soltanto l'ultimo ordine include generi e specie che possono considerarsi appartenenti pienamente alla pedofauna. Gli altri ordini comprendono specie di cui soltanto poche possono essere considerate dei veri animali del suolo.

Così, gli araneidi sono tra i più ubiquitari animali terrestri e possono trovarsi, in gran numero, nelle fessure del terreno, dove predano differenti animali. Tra gli araneidi si ricordano il genere *Atypus* (figura 75a) un grande predatore di vermi del suolo, il genere *Latrodectus* che vive sotto pietre ed in buchi, le specie sud-europee *Cteniza ariana*, attivo predatore, e *Trochosa singoriensis* che costruisce in profondità gallerie tubolari. Alcuni scorpioni (*Scorpionida*, *Solpugida*, *Phrynichida*, *Theliphonida*), viventi nelle regioni calde, sono predatori più o meno attivi e trascorrono il tempo sotto le pietre o le cortecce degli alberi o le fessure del terreno. Tra gli uropigi si rammenta il genere *Schizonomus* (figura 75b), di piccole dimensioni, vivente in ripari nel terreno, mentre tra gli pseudoscorpioni va ricordato il genere *Neobisium* (figura 75c) ed il genere *Vachonium* (figura 75d). Tra gli opilioni, che sono provvisti di lunghe zampe e si distinguono dai ragni per l'assenza di peduncolo (il prosoma è fuso con l'opistosoma), prosperanti in ambienti umidi ricchi di sostanza organica e presenti nella lettiera vegetale, si annovera il genere *Trogula* (figura 75e) ed il genere *Habrobunus* (figura 75f). Essi predano piccoli insetti e vivono in strati organici o su materiali vegetali.

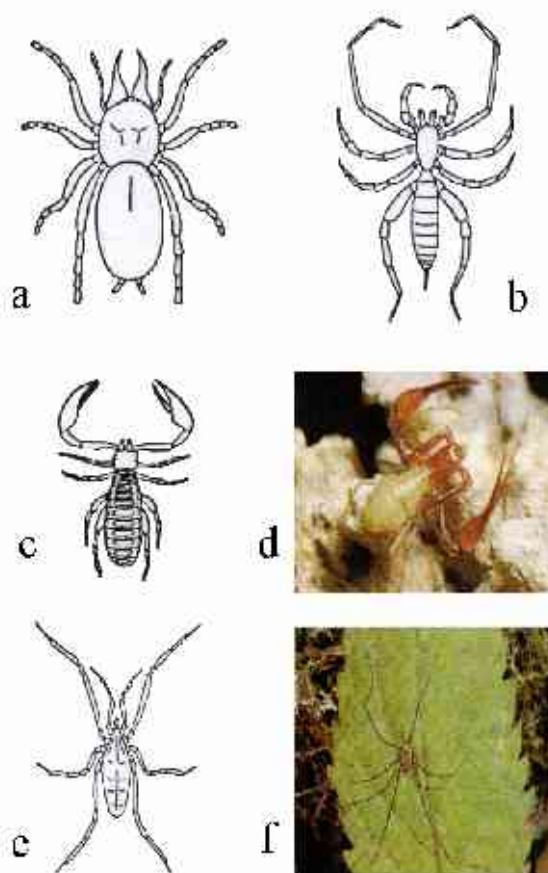


Fig. 75 – Alcuni generi di aracnidi dell'ordine *Araneida*: a) *Atypus*; *Uropygi*: b) *Schizonomus*; *Pseudoscorpiones*: c) *Neobisium*; d) *Vachonium*; *Opiliones*: e) *Trogula*, f) *Habrobunus*.

Gli acari (ordine *Acarina*) sono il gruppo più numeroso, hanno la lunghezza di circa un millimetro e, grazie alle piccole dimensioni, possono occupare una gran varietà di microambienti.

Molti sono spazzini conducenti vita libera, mentre altri sono parassiti. Tra gli acari si annoverano specie predatrici di nematodi, di collemboli, di larve di ditteri, di afidi ed altri insetti (figura 76), specie che utilizzano mucillagini batteriche, lieviti, spore ed ife fungine, oltre che materia organica in decomposizione.



Fig. 76 – *Allothrombium fuliginosum* nell'atto di predare un afide di oltre tre volte le sue dimensioni.

Gli acari oribatei, indicati anche con il termine anglosassone di *beetle-mites*, sono sicuramente i più caratteristici trovati nel suolo. Le due più importanti suddivisioni tassonomiche, gli *Aptyctima* ed i *Ptyctima*, sono quelle che si reperiscono con maggiore frequenza e numerosità nel terreno. In particolare, il gruppo *Ptyctima* rappresenta i cosiddetti acari armadilli per la loro capacità di piegare la parte anteriore del corpo (propodosoma) rispetto a quella posteriore (opistosoma) venendo, così, ad assumere un aspetto quasi sferico, che consente loro, probabilmente, di proteggersi dalla siccità o dall'eccesso idrico dei ristagni d'acqua e di difendersi dai predatori (insetti stafilinidi, scimmidi e ptilidi, ma anche piccoli acari predatori).

Gli oribatei possono resistere a grandi variazioni d'umidità. Molte specie possono rimanere per molte ore in condizioni di disseccamento e le specie di alcuni generi (*Galumna*, *Carabodes*) sono in grado di resistere alla siccità anche per molti giorni.

Gli acari oribatei manifestano chiaramente la loro capacità di frantumare in piccole particelle i residui vegetali (copertura e legno morto) e spesso si alimentano di alghe, funghi e licheni. Questi acari, nutrendosi d'ife o di spore del terreno, possono stimolare la crescita fungina a seguito dell'asportazione delle ife senescenti e disseminazione delle diverse forme propagative. Gli acari, inoltre, in qualità di detritivori ed in rapporto alla

velocità d'assunzione di cibo, producono feci che hanno capacità d'aggregazione delle particelle terrose e sono, pertanto, un'importante componente della struttura

del suolo. Un esempio di comportamento del tipo di quello descritto ci viene offerto da una specie molto comune di acaro oribateo, il *Platynothrus peltifer*. Le femmine depongono circa 250 uova, di forma ovale, da cui schiudono piccole larve chiare, esapodi, molto simili agli adulti che mutano in tre successivi stadi ninfali d'individui, prima chiari, poi scuri, ottapodi, che a loro volta mutano, 150 giorni dopo la schiusa delle uova, in adulti dall'aspetto brillante e rilucente. Gli accoppiamenti sono continui, con la conseguenza che i diversi stadi del ciclo biologico sono coesistenti.

Gli oribatei hanno, normalmente, fluttuazioni di popolazione minime ed il loro numero tende a essere costante, segno di grande adattamento alle più diverse condizioni.

Gli acari oribatei sono molto importanti nella demolizione della materia organica e nell'attacco di residui vegetali, anche molto secchi (genere *Pelops*). La specie *Hypochothonius rufulus* mostra, apparentemente, un comportamento necrofago e si alimenta di piccoli collemboli morti. Altri consumano legno in decomposizione, mentre gli stadi giovanili dei generi *Hemanniella*, *Liacarus*, *Cepheus* e *Carabodes* sono noti per la loro capacità di scavare il terreno e costruire ripari mediante piccoli rami, piccioli fogliari ed altri detriti vegetali. Le uova sono deposte su foglie cadute e, con la schiusura, danno luogo agli stadi pre-adulto che restano nella massa vegetale in decomposizione fino all'emergenza degli adulti.

Minunthozetes semirufus è una specie molto comune nei suoli prevalentemente minerali, anche se le forme giovanili di oribatei sono spesso scarse in suoli non organici e sono i soli adulti che ivi migrano. Alcuni acari oribatei sono schematicamente rappresentati nella figura 77.

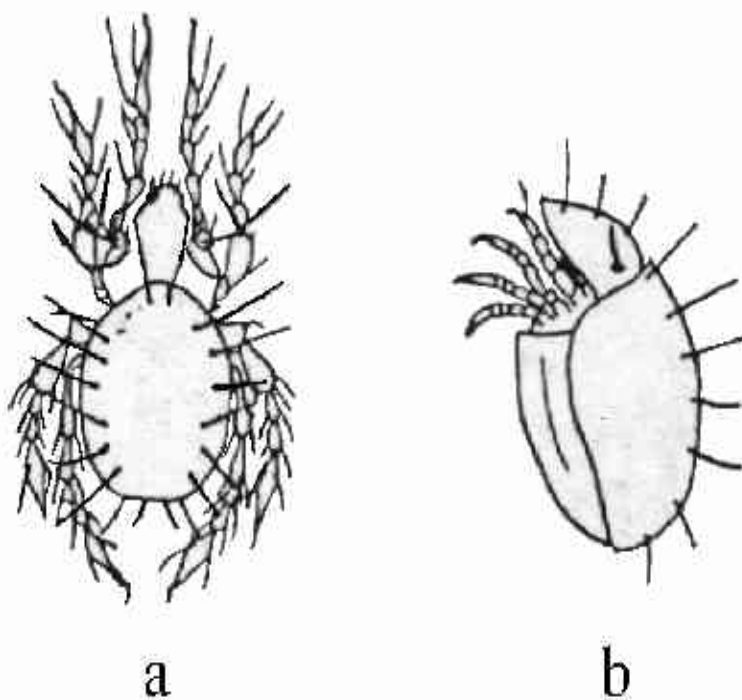


Fig. 77 – Acari oribatei: a) genere *Belba*, un acaro muschioso; b) genere *Oribotridia*, un acaro armadillo.

Altri acari (*Acarina*), tipicamente viventi nel terreno, su foglie morte o su altri residui vegetali, sulla sostanza organica e sull'humus, su differenti substrati pedologici, sono indicati nella figura 78.

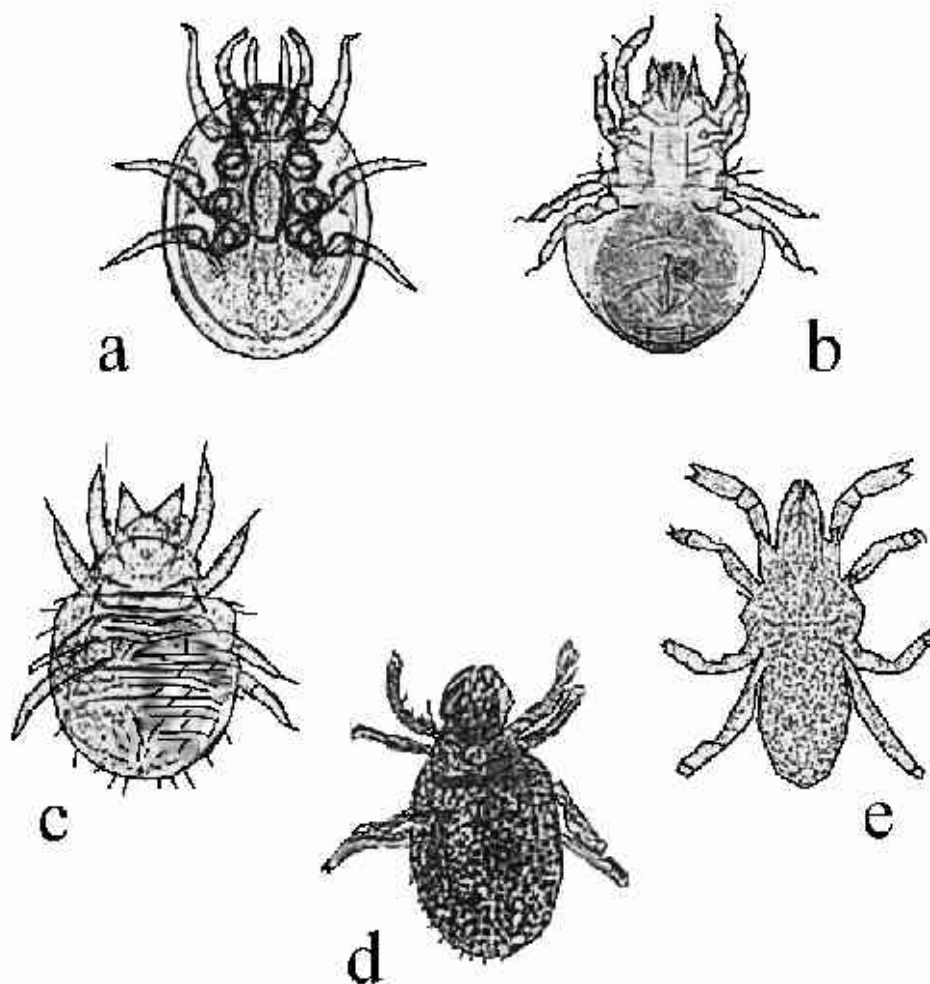


Fig. 78 – Alcuni acari tipicamente viventi nel terreno: a) *Olodiscus minima* (sottordine *Mesostigmata*), vivente sulle foglie morte in decomposizione; b) *Chamobates schutzi* (*Cryptostigmata*), molto frequente nel terreno (ninfa); c) *Eobrachythonius grandis* (*Cryptostigmata*), a volte frequente nella lettiera forestale e nei terreni umiferi; d) *Nanorchestes arboriger* (*Endeostigmata*), una piccolissima specie saltatrice tipica dei terreni di brughiera; e) *Alicorhagia fragilis* (*Endeostigmata*), un minuscolo acaro ad habitat tipicamente terricolo.

Nella figura 79 sono schematicamente rappresentate alcune specie di acari che vivono a spese delle piante (fitofagi fitomizi) o di alcuni insetti come le api, sulle derrate alimentari ed a carico della sostanza organica.

Molti acari sono onnivori e sono capaci di nutrirsi di prede o di altri alimenti a diverso livello trofico e di differente canale energetico e con possibile competizione tra predatore e preda. Ad esempio, gli acari si nutrono di funghi, ma anche di nematodi i quali, a loro volta, utilizzano come cibo i medesimi funghi.

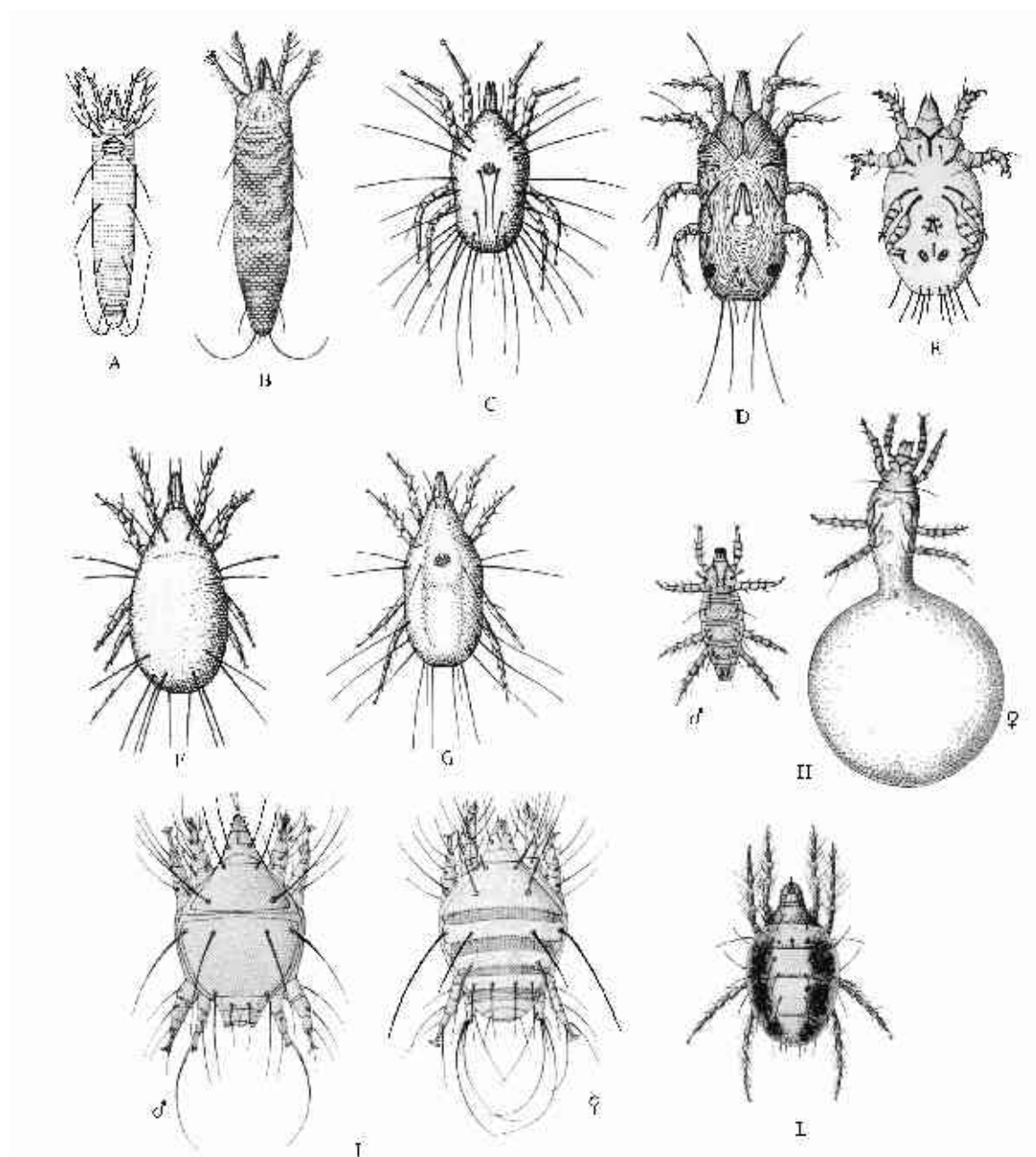


Fig. 79 – Alcune specie di acari schematicamente rappresentati. A) *Eriophyes piri* (famiglia *Eriophyidae*, con individui provvisti soltanto di due paia di zampe), lungo circa 0,2 mm, vive sulle foglie di pero di cui provoca la caduta nel terreno; B) *Aceria sheldoni*, l'acaro delle meraviglie; C) *Glycyphagus domesticus*, l'acaro domestico, lungo meno di 0,5 mm, vivente anche su foglie morte in decomposizione; D) *Carpoglyphus passularum*, l'acaro della frutta, di 0,3-0,4 mm, vive su materiale organico e sulla frutta secca decomponendola; E) *Rhizoglyphus echinopus*, di circa 1mm, è un acaro necrofilo che apre la via all'azione decomponente dei funghi, nei terreni umidi; F) *Acarus siro*, si nutre di sostanze organiche; G) *Tyrophagus putrescentiae* si nutre di funghi e di sostanza organica; H) *Pyemotes ventricosus*, maschio (0,2 mm) e femmina pubera (0,25 mm) vive a spese di larve di insetti; I) *Acarapis woodi*, maschio e femmina, di circa 1 mm di lunghezza, vive nel primo paio di trachee toraciche delle api, provocando occlusioni, intossicazioni e la morte; L) ragnetto rosso del genere *Tetranychus* (fitofago fitomizo).

Come normalmente accade in natura, se alcuni acari sono predatori, altri sono attivamente predati e ciò contribuisce a mantenere le loro popolazioni in un naturale

equilibrio numerico (figura 80).



Fig. 80 – Larva di dittero *Cecidomidae* che preda uova di acari fitomizi del fagiolo (a sinistra) e neanide di emittero *Miridae* in atto di predare acari fitomizi della melanzana.

In alcuni casi, gli acari possono dar luogo a fenomeni di *feed-back* durante il cammino di degradazione della sostanza lungo le catene trofiche, nel senso che il materiale organico da loro utilizzato ed espulso con le feci non passa al successivo anello della catena trofica ma è da essi riutilizzato. E' il caso dell'acaro *Tyrophagus putrescentiae* che si nutre di un fungo e riutilizza come alimento le proprie feci, le quali, così come osservato al microscopio elettronico ed a scansione, con la seconda digestione subiscono una maggiore degradazione delle cellule fungine. Ciò rappresenta per l'acaro una nuova fonte d'energia, poiché al materiale fungino si aggiungono batteri d'origine intestinale, con tutto il patrimonio enzimatico. Naturalmente, queste forme comportamentali di coprofagia sono diffuse in molti altri gruppi animali.

La diffusione degli acari nei terreni non è ovunque la stessa. Così essi sono più numerosi nei terreni del bosco, meno nel pascolo ed ancor meno nei campi coltivati, anche se con variazione secondo il tipo di suolo (torboso, argilloso-marnoso, sabbioso marnoso). Nei campi coltivati, possono dominare, con elevate densità di popolazione, gli acari fitoparassiti. Le lavorazioni del terreno molto spesso hanno effetti negativi sulla fauna del suolo, ma non per gli acari i quali, molto spesso, se n'avvantaggiano. Con le lavorazioni vengono a mancare molti dei loro predatori e competitori per il cibo e possono trarre vantaggio dal più elevato tasso di riproduzione. Gli acari batteriovorì e fungivorì sono favoriti dalla presenza di un elevato numero di microrganismi nel suolo che viene indotto dal rilascio di sostanze nutritive (concimazioni) dopo l'aratura.

Il subphylum *Crustacea* è un gruppo relativamente piccolo comprendente circa 40.000 specie viventi. Alcune specie della classe *Ostracoda* (somiglianti a piccoli semi o a mitili in miniatura) e della classe *Malacostraca* (più precisamente dell'ordine *Isopoda*, incluso in questa classe) sono di un certo interesse da un punto di vista dello studio del terreno. Il corpo dei crostacei è costituito da un capo (*cephalon*) ed un tronco, distinto in torace (*pereion*) ed addome (*pleon*). Le appendici sono disposte segmentalmente e sono tipicamente biramose. Nella maggior parte delle specie l'esoscheletro è calcificato. I crostacei si distinguono dalle caratteristiche del capo, che reca un paio di occhi composti e cinque paia di appendici cefaliche. Due paia di loro sono dette, rispettivamente, *prime antenne* o *antennule* e *seconde antenne* o *antenne*, con funzioni sensoriali, locomotorie e d'alimentazione. Dietro le antenne, il terzo paio di appendici, le *mandibole* e poi le altre due paia, le *prime mascelle* e le *seconde mascelle*. In parecchi gruppi, una o più appendici toraciche anteriori sono modificate come strutture specializzate per la manipolazione dell'alimento e sono dette *piedi mascellari* o *massillipedi* o *gnatopodi*.

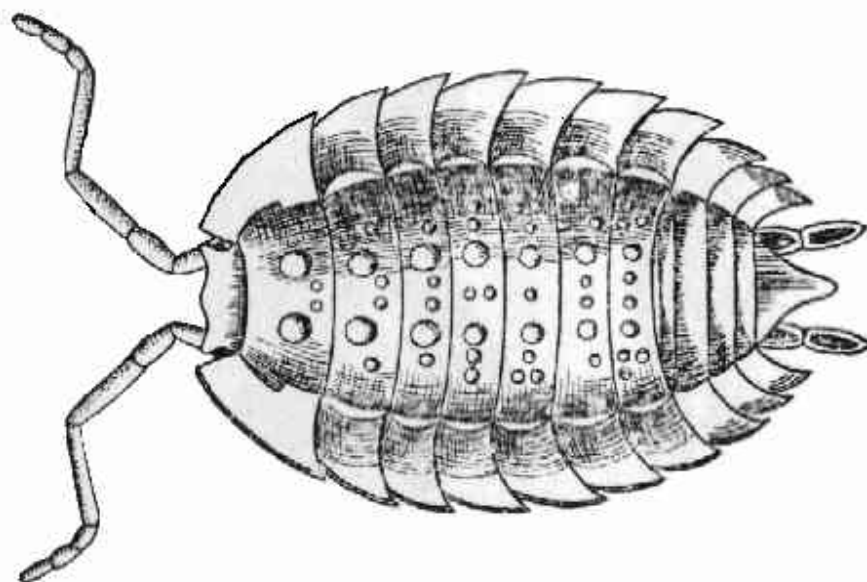


Fig. 81 – Rappresentazione schematica di *Oniscus murarius*, un isopodo terrestre che vive libero nella terra umida e che può arrecare danni alle radici ed organi sotterranei di colture ortensi e floreali.

All'ordine degli isopodi appartengono numerose specie che vivono nel terreno, lunghe circa 1-3 cm, fino a 25 cm. Gli isopodi hanno un unico paio di massillipedi, sono privi di carapace e sono appiattiti dorso-ventralmente. Si ricordano gli isopodi oniscoidei comprendenti il genere *Oniscus* (*Oniscus murarius*) rappresentato in schema nella figura 81 ed i porcellini di terra o porcellini di S. Antonio (*Porcellio scaber*) che si possono osservare nella figura 82, mentre si nutrono di detriti organici. Generalmente vivono in ambienti molto umidi per impedire la perdita d'acqua corporea, si possono trovare frequentemente sotto sassi o i residui delle piante, dove si alimentano di sostanze vegetali ed animali, vive o morte.



Fig. 82 – Porcellini di terra (*Porcellio scaber*), capaci di avvolgersi a palla e viventi nella terra umida, sulla sostanza organica.

Il subphylum *Uniramia* è costituito da animali con appendici uniramose. Le appendici cefaliche sono un paio di antenne, un paio di mandibole ed un paio o due paia di mascelle. Il subphylum *Uniramia* è quello più grande del regno animale, per la presenza della classe *Insecta*, che comprende quasi un milione di specie note, una delle

cinque classi di questo *phylum*. Le altre classi sono quella dei *Diplopoda* o millepiedi, con circa 7.500 specie, dei *Chilopoda* o centopiedi, con circa 3.000 specie, dei *Pauropoda*, con circa 120 specie e dei *Symphyla*, con circa 400 specie.

I diplopodi o millepiedi sono come un cilindro, formato da numerosi segmenti (metameri o somiti) e zampe, lungo da 2 mm a 30 cm. Il primo somite dopo il capo è privo di arti, è detta collo, ed insieme ai successivi tre segmenti, provvisti di arti, forma il torace; i rimanenti somiti sono fusi due a due ed ogni paia è detto *diplosomita*; naturalmente ogni diplosomita possiede due paia di zampe (da cui il nome di diplopodi). I diplopodi, grazie alla spinta simultanea delle sue numerose zampe, riescono a farsi strada lentamente attraverso la lettiera ed i terreni sciolti e ricchi di materiale organico, alimentandosi di foglie in decomposizione e di altre sostanze vegetali. I millepiedi si muovono lentamente e non sono aggressivi, ma non sono inermi. Si appallottolano ed assumono una forma a spirale protettiva quando vengono disturbati (*Pachyjulus sabulosus* e *Glomeris maculata*) e molte specie producono un liquido irritante che riescono a spruzzare fino alla distanza di quasi 1 cm. Molti diplopodi sono dannosi alle coltivazioni come il *Blanjulus guttulatus*, lungo 1-1,5 cm, di colore bianchiccio o bruno, con i fianchi macchiati di rosso e che danneggia tuberi e bulbi bucherellandoli ed il *Microblanjulus calcivagus* che è dannoso alla barbabietola.

I chilopodi o centopiedi sono più appiattiti dei diplopodi, hanno un sol paio di zampe per metamero. *Scolopendra morsitans* lunga 8-10 cm, provvista di 21 paia di zampe e delle forcipule con le quali può uccidere piccoli animali; *Lithobius forficatus* con 14 paia di zampe; *Scutigera coleoptrata* che si riconosce per le zampe lunghissime e sottili, mentre il piccolo corpo porta sul dorso le stigme disposte in una sola serie ed in numero inferiore a quella dei segmenti. I chilopodi normalmente sono carnivori e si muovono in modo relativamente veloce, strisciando sul terreno umido di notte o attraverso gli habitat umidi, sotto sassi e residui vegetali, e fanno parte integrante della catena alimentare del suolo. I diplopodi *Glomeris maculata* (in forma schematica) e *Sigmoria aberrans* ed il chilopode *Scutigera coleoptrata* sono mostrati nella figura 83.



Fig. 83 – Da sinistra: *Glomeris maculata*, in movimento ed appallottolato, *Sigmoria aberrans*, libero su un terreno erboso e *Scutigera coleoptrata* in atto di divorare un'ooteca di una blatta.

I sinfili sono piccoli unirami di lunghezza compresa tra 2 e 10 mm, simili ai chilopodi, con 12 segmenti provvisti di zampe. I sinfili vivono nel terreno e nella vegetazione in decomposizione. Il più diffuso è il genere *Scutigera* (figura 84o).

Le forme schematiche di alcuni generi di diplopodi, chilopodi, pauropodi e sinfili, utili per un primo approccio per il riconoscimento, sono rappresentate nella figura 84.

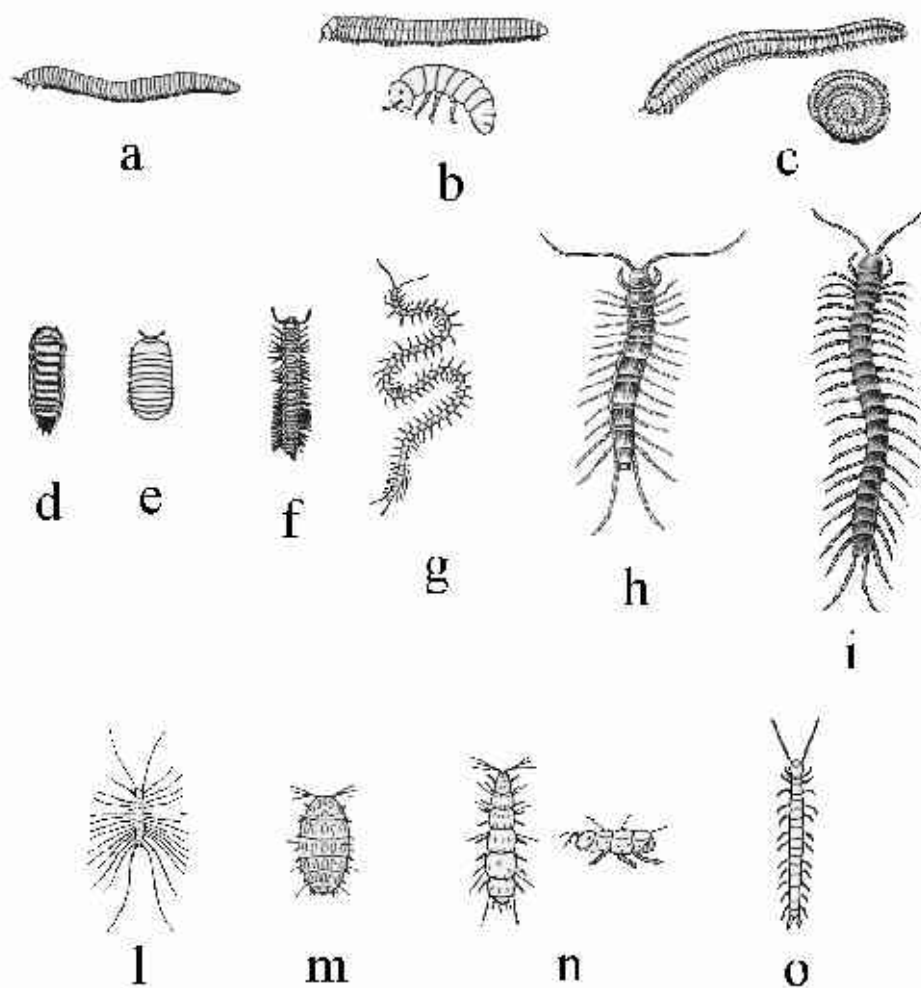


Fig. 84 – Forme schematiche di alcuni generi di diplopodi: a) *Polyzonium*, b) *Cylindrojulius*, con larva esapoda, c) *Pachyjulus*, nella postura distesa ed arrotolata su se stessa d) *Polyxenus*, e) *Glomeris*, f) *Polydesmus*; chilopodi: g) *Geophilus*, h) *Lithobius*, i) *Scolopendra*, l) *Scutigera*; pauropodi: m) *Eurypauropus*, n) *Pauropus*, con larva esapoda; sinfili: o) *Scutigera*.

La classe degli insetti viene studiata nell'ambito di una specifica disciplina, che è l'entomologia, per la vastità, la variabilità e la complessità degli ordini, delle famiglie, dei generi e delle specie che vi appartengono. I caratteri fondamentali sono la distinzione del corpo in capo, torace ed addome. Il capo è una capsula protettiva contenente il ganglio cerebrale (cervello o cerebro o sincerebro), recante occhi composti (costituiti da occhi semplici detti *ocelli*), un paio di antenne e l'apparato boccale. Il torace, costituito da tre segmenti, possiede l'apparato respiratorio (con le trachee che comunicano all'esterno mediante aperture dette stigmi) e rappresenta il centro locomotore, in quanto la maggior parte degli insetti adulti porta 3 paia di zampe e uno o due paia di ali. Gli insetti sono gli unici invertebrati provvisti di ali, anche se la sottoclasse *Apterygota*, particolarmente interessante nello studio della pedofauna, è costituita da individui atteri, privi di ali. Tale condizione è considerata primitiva, nel senso che essi derivano da progenitori privi di ali. Altri ordini di insetti sono atteri ma non primitivamente, derivando da progenitori alati. L'addome, infine, è costituito dagli ultimi undici segmenti

del corpo, anche se in molte specie alcuni di essi siano notevolmente ridotti o fusi tra loro. L'addome contiene la maggior parte degli organi interni, vale a dire il cuore, l'apparato escretore (tubi malpighiani), gli organi riproduttori e gran parte del canale alimentare. Molti insetti presentano metamorfosi completa (olometaboli) o incompleta (eterometaboli).

Come accennato, la sottoclasse degli atterigoti è quella più interessante da un punto di vista dello studio degli insetti viventi nel terreno. Questa sottoclasse comprende l'ordine *Protura*, *Collembola*, *Diplura* e *Tisanura*.

I proturi sono insetti piccolissimi, lunghi al massimo 2 mm, dal corpo allungato, biancastro e poco sclerificato. Il capo è privo di antenne e di occhi, munito di due organi di senso circolari (pseudo-occhi), considerati antenne rudimentali. L'apparato boccale è stiliforme, atto a pungere e non visibile esternamente (insetti entognati). Le zampe del primo paio sono più sviluppate delle altre e sono portate in avanti a guisa d'antenne. L'addome è di 11 segmenti, più quello anale, detto *telson*, e spesso mancano di trachee e di stigmi. La descrizione del corpo è quella tipica di animali che vivono nel terreno ed, infatti, sono comuni nell'humus, nel terriccio, sotto le pietre, fra i vegetali in decomposizione, sotto i muschi. Si possono anche rinvenire nei nidi di piccoli mammiferi (talpe, arvicole) ed, eccezionalmente, nelle cavità degli alberi. Per un metro quadrato di terreno possono essere presenti in quantità enorme, fino a molte centinaia d'individui. Sono note circa 200 specie diffuse in tutto il mondo e tra i generi più comuni si ricordano *Acerentomon*, *Eosentomon*, *Proturentomon*, *Acerentulus*, *Acerella*, *Berberentulus*. L'ordine dei proturi fu istituito dal Silvestri, il quale descrisse per la prima volta, nel 1907, l'*Acerentomon doderoi*, lungo 1,5 mm e vivente nel materiale umifero del terreno (figura 85).

Alcune specie di proturi, approfonditamente studiati in Danimarca da Tuxen, sono *Acerentulus danicus* ed *Eosentomon armatum*. Dagli studi è emerso che lo sviluppo embrionale è di tipo anamorfo (anametabolia), vale a dire la neanide esce dall'uovo con 8 uriti più il telson e poi, con tre mute, acquista altrettanti uriti fino allo stadio di adulto, caratterizzato da 12 segmenti complessivi. La prima specie è attiva nei primi 2 cm di profondità del terreno, principalmente nei mesi estivi durante i quali appaiono i successivi stadi del ciclo biologico. *E. armatum* estende la propria sfera d'azione fino a 5 cm di profondità ed ha un periodo di sviluppo meno definito, poiché i differenti stadi di sviluppo si rinvengono contemporaneamente.

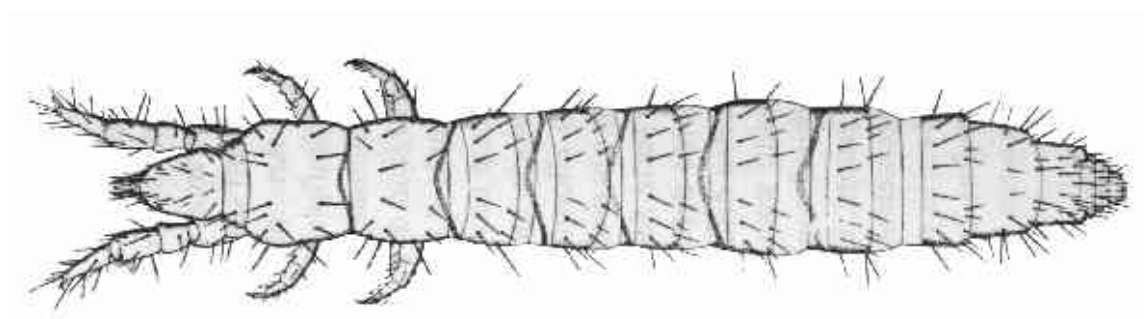


Fig. 85 – *Acerentomon doderoi*, un protura che vive comunemente nel terreno e nell'humus (da Silvestri, 1938).

I collemboli sono un ordine di minuscoli e delicati insetti, lunghi 1-2 mm e raramente di più (massimo 7-8 mm), ma anche solo un quarto di millimetro (nei

piccolissimi della famiglia *Neelidae*). Sono provvisti di un apparato boccale masticatore (entognato), talora trasformato in pungente-succhiante in seguito all'allungamento delle mandibole e delle mascelle. Le antenne sono corte e di pochi articoli, gli occhi sono assenti o molto atipici. Hanno un tegumento molle e bianchiccio o variamente colorato e spesso coperto da squame a tinte splendenti e vivaci. Le zampe presentano vistose unghie e l'addome presenta solo 6 segmenti, distinti o quasi fusi, di cui il primo porta un tubo ventrale, detto *colloforo*, sempre bagnato da un liquido coloso, da cui il nome dato all'ordine, con cui gli insetti si fissano efficacemente al supporto. Mancano i tubi malpighiani e spesso sono assenti le trachee. Sono provvisti di un particolare meccanismo ventrale che consente loro quei caratteristici balzi repentini e per questo è stato assegnato ad alcune specie il nome di pulci dei ghiacciai e di pulci di terra.

I collemboli, di cui sono note circa 2.000 specie distinte nel sottordine artropleoni (con i 6 segmenti dell'addome nettamente distinti) e nel sottordine sinfipleoni (con i primi 4 urosterniti fusi), sono insetti edafici e molti sono strettamente connessi con il terreno. Amano l'umidità e brulicano sotto il fogliame marcescente nel terreno ed in altri materiali in decomposizione. Vivono nelle sostanze umifere ed il materiale coloso che producono ha un effetto favorevole sulla struttura del terreno, in relazione al fatto che funge da collante tra le particelle argillose e l'humus, favorendone l'aggregazione e la stabilità strutturale (formazione del glomerulo).

Dei collemboli, gli artropleoni sono il sottordine più ricco di specie, soprattutto per quanto attiene la pedofauna, mentre i sinfipleoni sono meno numerosi, non molte sono le specie che abitano il terreno e fra essi bisogna ricordare il più piccolo esapodo del terreno, il genere *Neelus*. Gli artropleoni occupano un ampio spessore di suolo ed i diversi generi e specie hanno adattamenti morfologici e funzionali in relazione al loro

habitat. Normalmente i generi con le zampe e le antenne più lunghe e dotati dell'organo saltatorio addominale particolarmente sviluppato, come *Entomobyra*, *Orchesella*, *Tomocerus*, abitano gli strati più superficiali del suolo e della lettiera forestale. Al contrario, negli strati più profondi del terreno è possibile trovare forme con corte appendici, il genere *Folsomia*, o con organi di salto ridotti a vestigia, come i generi *Tullbergia* e *Friesea*. Le specie tipicamente sotterranee sono cieche, bianche e lunghe meno di 1mm. Hanno bisogno di molta umidità, ma sono state riscontrate notevoli differenze tra le specie circa la tolleranza al secco. I collemboli non sono predatori anche se sono stati registrati casi di cannibalismo e di notevoli predazioni di nematodi. In particolare, *Hypogastrura armata* è stata trovata alimentarsi di muschio, *Friesea claviseta* decompone sostanza organica, *Nearura coronifera*, *Tullbergia quadrispina* e *Folsomia quadrioculata* divorare micelio fungino, *Hypogastrura manubrialis* danneggiare coltivazioni di funghi mangerecci.

E' interessante notare che molti collemboli tollerano lussuose crescite di ife fungine, al contrario di quanto accade per gli acari oribatei e per molti altri invertebrati del suolo. Il numero delle popolazioni di collemboli, inoltre, può subire una variazione stagionale molto marcata, al contrario di quanto avviene per gli acari oribatei che tendono ad essere numericamente costanti nel tempo.

Come gli altri ordini degli atterigoti, i collemboli non subiscono metamorfosi, ma presentano numerose mute (fino a 50), anche dopo la maturità sessuale, stimulate da traumi o eccitazioni esterne.

Molte specie si aggregano e formano biomasse enormi, di milioni di individui, di piccoli insetti di un millimetro che coprono il suolo per spessori di svariati centimetri. Basti pensare che la specie *Hypogastrura manubrialis*, che vive in prossimità della superficie, depone grappoli di circa 30 uova sferiche ad intervalli di 2 settimane, per 5-10

mesi dell'anno, su sostanza organica in decomposizione e che *H. purpurescens*, una specie tipicamente gregaria, depone uova per 1-7 settimane, in relazione all'andamento stagionale.

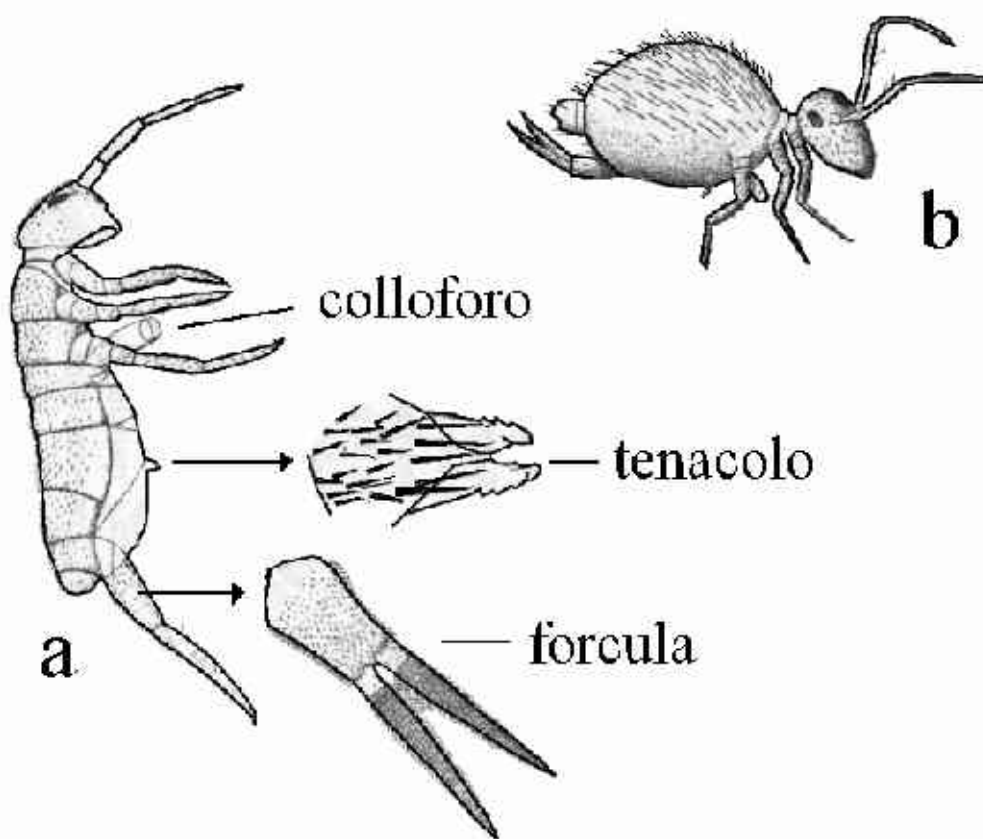


Fig. 86 – Alcune specie di collemboli viventi nel suolo sulla sostanza organica in decomposizione: a) *Isotomurus palustris* (notare il tubo ventrale o colloforo, sul primo urosternite, e l'apparecchio saltatorio costituito dal tenacolo, sul terzo urosternite, e dalla forcula, un processo posteriore biforcuto), lungo 2-3 mm; b) *Sminthurus viridis*, lungo anch'esso 2-3 mm (da Tremblay, 1988).

Il regime dietetico è raramente carnivoro e la maggior parte dei collemboli è fitosaprofaga e micofaga, nutrendosi, inoltre, di polline, alghe, licheni, materiali organici vari, compreso il legno in decomposizione dei residui vegetali. *Archisotoma Besselsi* e *Isotomurus palustris* (figura 86a) divorano i veli batterici ed, insieme a molte altre specie, finiscono, con il loro numero immenso, con l'essere ecologicamente utili, perché affrettano la disorganizzazione dei residui vegetali ed animali e contribuiscono alla più rapida circolazione della materia. Molte specie, come già accennato, vivono in profondità nel suolo, fino agli orizzonti umiferi, dove utilizzano escrementi di artropodi vari e di altri animali, ma non i resti vegetali. Alcune specie sono fitofaghe (fillofaghe ed antofaghe) e, pertanto, possono essere dannose alle coltivazioni, come *Sminthurus viridis* (figura 86b) e *Bourletiella hortensis*, infauste a svariati ortaggi, specialmente nei semenzai. I nemici dei collemboli sono acari predatori ed insetti rappresentati da piccoli coleotteri, larve di ditteri e dipluri iapigidi.

I dipluri sono un altro ordine di atterigoti, a torto assimilati fin a tempi recenti ai

tisanuri, dai quali risultano invece filogeneticamente lontani. Sono note circa 700 specie che si rinvencono, comunemente, nel terreno umido, sotto pietre e cortecce, dove si alimentano di minuscoli detriti organici, di altri piccoli invertebrati, di alghe e di miceli. I dipluri sono molto piccoli, raramente oltre un centimetro di lunghezza, hanno corpo molle, allungato, con i lati paralleli, leggermente depresso, privo di pigmentazione, ma talora provvisto di squame. Sono completamente ciechi (caratteristica, questa, degli animali ad habitat terricolo), mancano dell'organo temporale dei gruppi affini, portano lunghe antenne pluriarticolate che ricordano quelle dei centopiedi. L'addome, di 11 segmenti, porta stili e sacculi ed all'estremità si orna di due appendici (cerci) che possono essere multiarticolate, corte (figura 87a) o lunghissime (figura 87b).

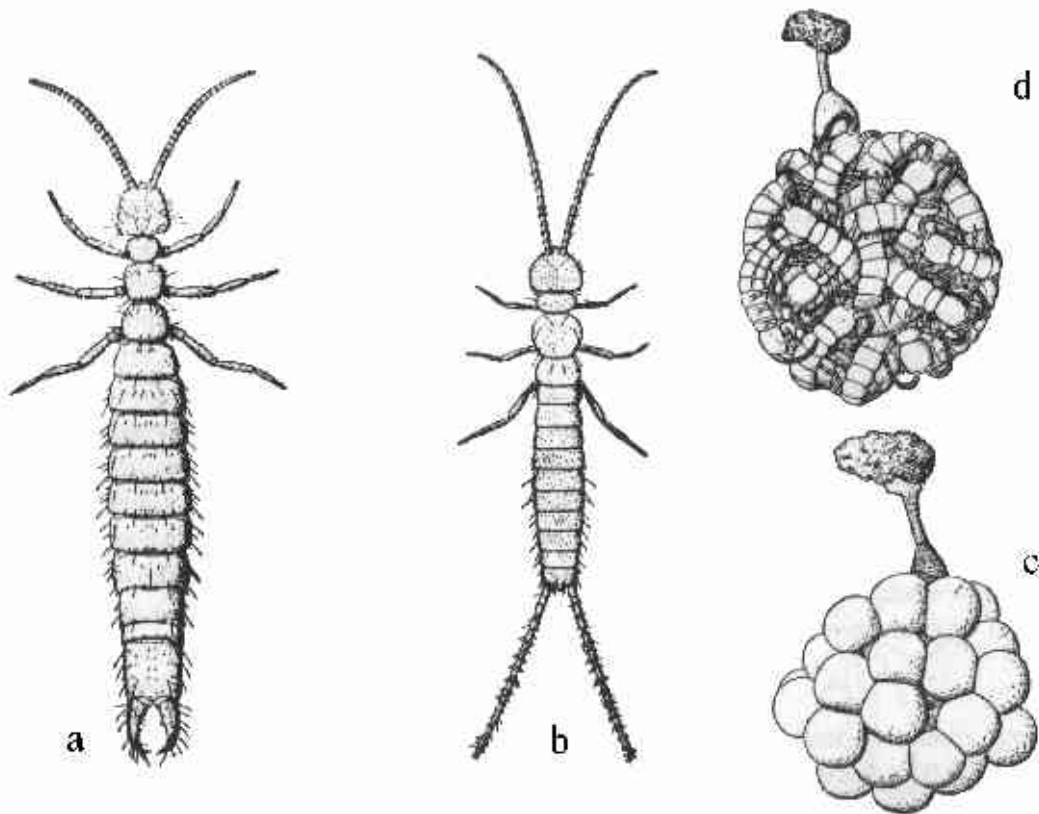


Fig. 87 – Due specie dell'ordine *Diplura*: a) *Iapyx solifugus*; b) *Campodea redii*, ambedue della lunghezza di 4-5 mm. Dal grappolo di uova, provviste di un unico peduncolo (c), sono schiuse le neanidi (d). Notare, nei due individui adulti, la differenza di lunghezza dei cerci.

I giovani nascono da uova a grappolo deposte in modo da mantenersi sospese alla volta di una piccolissima cavità ipogea (figura 87c e 87d). In particolare, in *Iapyx solifugus* (figura 87a) e *Protoiapyx major*, le uova sono deposte in grappoli di 10-20 e 20-30 unità, rispettivamente, sospese, mediante un unico peduncolo, alla volta di una cavità del terreno, a 10-30 cm di profondità. Le neanidi, dopo la prima muta, si disperdono alla ricerca di cibo, rappresentato da svariate sostanze vegetali del terreno quali miceli fungini, tessuti in disfacimento ed anche prede vive o morte, di dimensioni adatte ai piccoli dipluri. Lo sviluppo dei dipluri è ametabolico, con almeno una muta allo stato di adulto. L'ordine dei dipluri è suddiviso in quattro famiglie, oltre una fossile (famiglia *Ocelliidae*). Alcune specie di dipluri sono *Protoiapyx brasiliensis*, *P. congruens*, *P.*

stylifer, *P. incomprehensus*, *Symphylurinus Grassii*, *S. occidentalis*, *S. Swani*, *Anajapyx vesiculosus*, *A. mexicanus*; alcuni generi sono *Campodea* (figura 87b), *Plusiocampa*, *Troglocampa*, *Edriocampa*, *Afrocamp*, *Anisocampa*, *Campodella*, *Allocampa*, *Haplocampa*, *Parallocampa*, *Tritocampa*, *Procampodea*.

La conoscenza di quest'ordine è dovuta in gran parte al lavoro di quasi mezzo secolo del Silvestri e molto spesso si legge, anche in autorevoli libri, che questi insetti non hanno importanza economica. E' chiaro che il riferimento è ai danni che possono arrecare in agricoltura, ma l'importanza economica di questi piccoli insetti è, al contrario, sicuramente immensa. Un terreno, senza di essi, diventerebbe una struttura priva di vita, statica nel tempo e senza alcun valore riguardo alla possibilità di sopravvivenza delle comunità vegetali e delle piante coltivate. Grande è l'importanza di questi atterigoti nella prima degradazione della sostanza organica e nell'economia dei cicli biologici degli elementi chimici, al punto che, in assenza di essi, la superficie del globo terrestre si ricoprirebbe di una quantità immensa di rifiuti organici, si realizzerebbero pericolose circuitazioni dei cicli biologici elementari e la probabile conseguenza sarebbe la sparizione della vita dal nostro pianeta.

I tisanuri sono il quarto ordine di questi insetti primitivi atteri e senza metamorfosi (ametaboli), comprendenti circa 600 specie.

I tisanuri sono allungati, con apparato boccale masticatore, con due cerci sviluppatissimi ed un terzo, di pari lunghezza (paracercro), derivante dall'assottigliamento ed allungamento dell'undicesimo segmento addominale. Hanno un corpo appiattito e squamoso che rappresenta un adattamento alla vita entro fessure ed anfratti ed una protezione contro la traspirazione.

Alcuni gruppi (lepidotrichi) vivono sotto cortecce, foglie secche ed altri residui vegetali, altri (nicoletidi) sono sotterranei e cavernicoli, altri ancora (ateluridi), molto piccoli, vivono in associazione con formiche (mirmecofili) e termiti (termitofili). Grande è la loro capacità di attaccare la cellulosa della carta e materiali collosi di cui si nutrono. Molti tisanuri sono dannosi nelle case perché possono letteralmente corrodere e divorare libri e materiali cartacei.

Tra i tisanuri più noti si ricordano il genere *Machilis*, col torace ingobbato, le cui specie sono saltatrici e tipicamente si espongono al sole sulle rocce nude, e varie specie dei generi *Ctenolepisma* (figura 88) e *Lepisma* (di cui la più nota è la specie *L. saccharina*, ricoperta di squame argentee e lunga circa 1 cm) e la *Thermobia domestica*, con macchie brunastre, tutte viventi nelle case, dove sono note con il nome di "pesciolini d'argento".

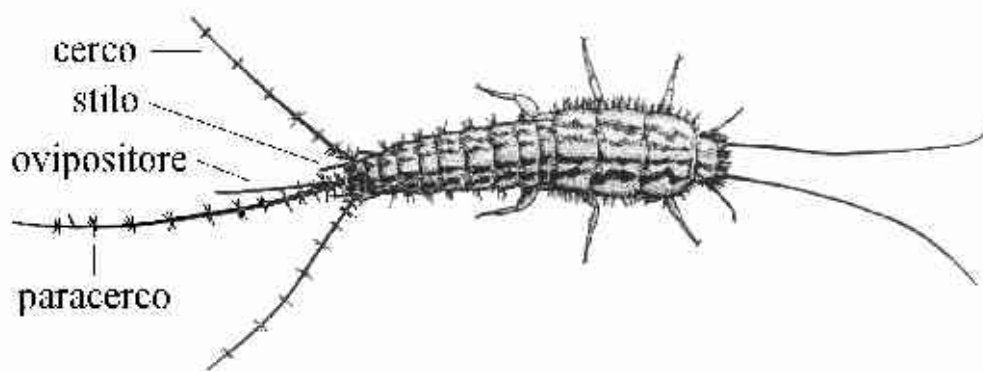


Fig. 88 – Rappresentazione schematica di un tisanuro, la femmina di *Ctenolepisma lineata* (da Tremblay, 1988).

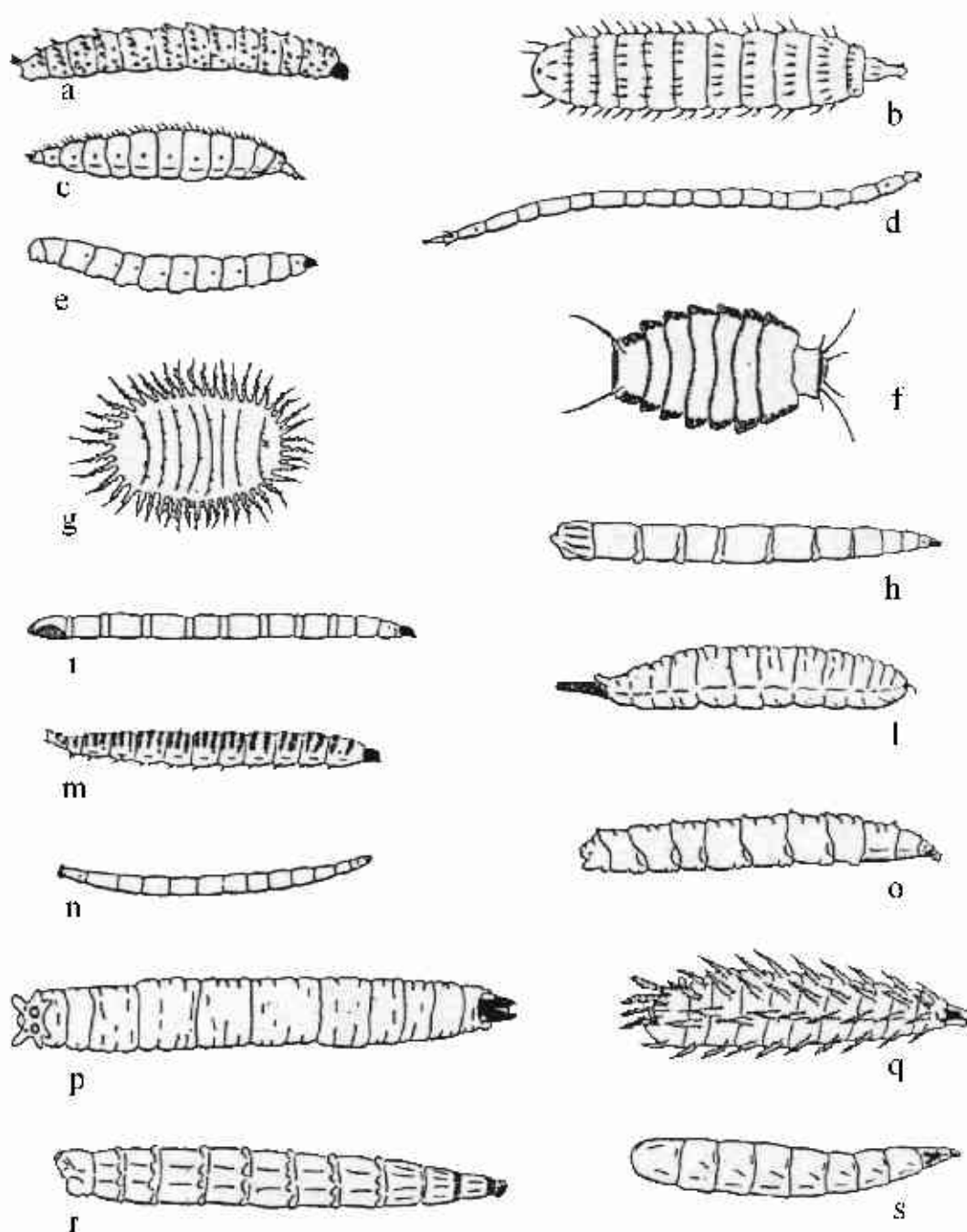


Fig. 89 – Larve dell'ordine *Diptera* viventi nel terreno: a) genere *Bibio*, famiglia *Bibionidae*, b) *Pachigaster*, degli *Stratiomyidae*, c) larva della famiglia *Cecidomyiidae*, d) mosca stilo del genere *Thereva*, famiglia *Therevidae*, e) larva fungivora della famiglia *Sciaridae*, f) *Lonchoptera*, dei *Lonchopteridae*, g) *Calomyia*, dei *Clythiidae*, h) larva della famiglia *Empididae*, i) *Liriomyza* della famiglia *Agromyzidae*, l) *Syritta*, dei *Syrphidae*, m) *Telmatoscopus*, dei *Psychodidae*, n) *Culicoides*, dei *Ceratopogonidae*, o) *Megaselia*, dei *Phoridae*, p) *Tipula*, dei *Tipulidae*, q) *Fannia*, dei *Muscidae* r) *Haematopota*, dei *Tabanidae*, s) *Phaonia*, dei *Muscidae* (da Keith e Mc Kevan, 1962).

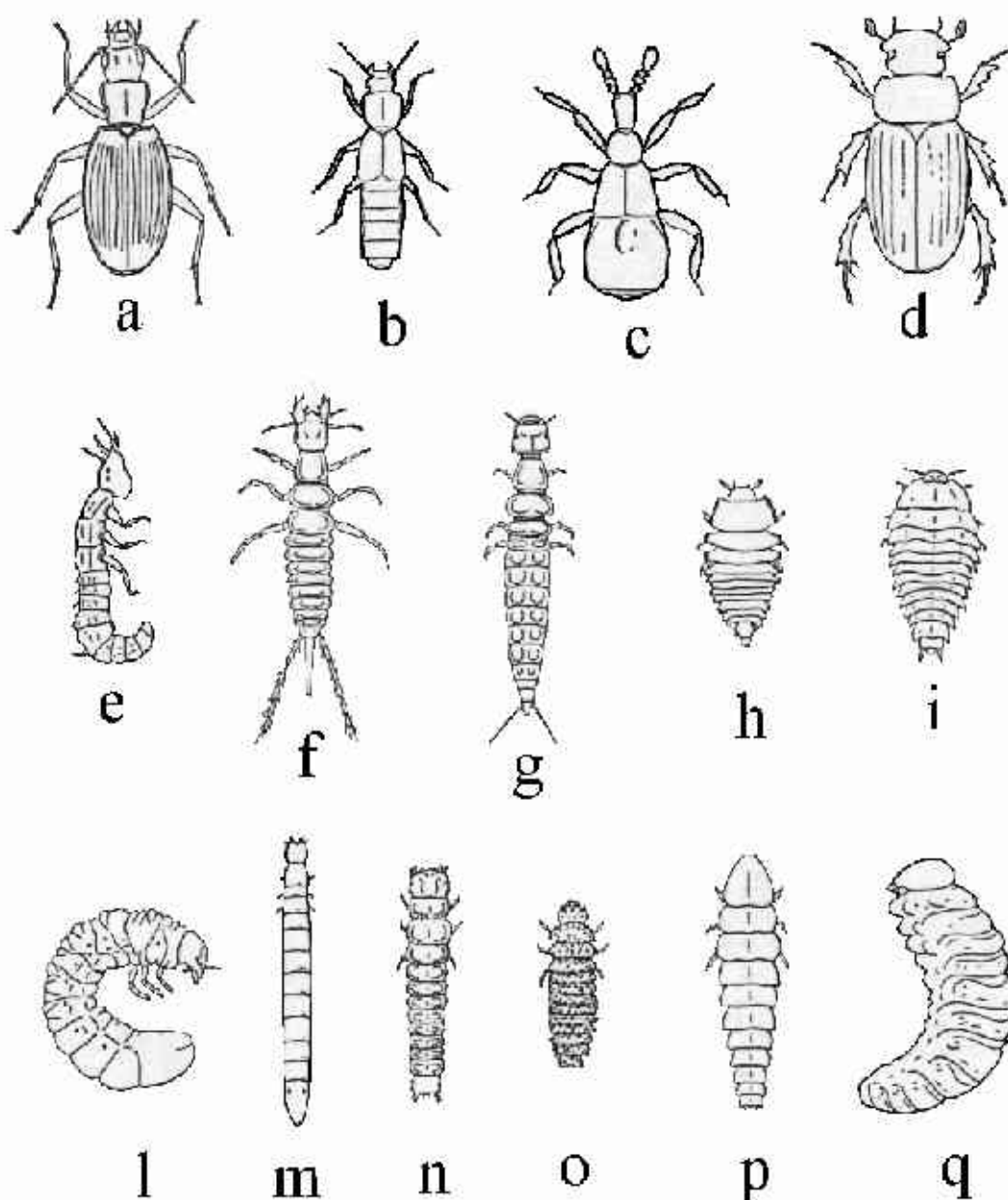


Fig. 90 – Alcuni principali generi della pedofauna dell'ordine *Coleoptera*. Adulti : a) *Prystanychus*, della famiglia *Carabidae*, b) *Bledius*, della famiglia *Staphylinidae*, c) *Claviger* dei *Pselaphidae*, d) *Aphodius* degli *Scarabaeidae*, e) *Cicindela* dei *Cicindelidae*, f) *Leistus* dei *Carabidae*, g) *Philonthus* degli *Staphylinidae*, h) *Scydmaenus* degli *Scydmaenidae*, i) *Silpha* dei *Silphidae*, l) *Popillia* dei *Scarabaeidae*, m) *Agriotes* degli *Elateridae*, n) *Cryptophagus* dei *Cryptophagidae*, o) *Mycetaea* degli *Endomychidae*, p) *Lampyrus* dei *Lampyridae*, q) *Otiorrhinchus* della famiglia *Curculinidae* (da Keith e Mc Kevan, 1962).

Esiste, poi, un'infinità di ordini, famiglie, generi e specie d'insetti aventi uno stretto rapporto con il suolo. Molti di essi conducono nel terreno tutto il ciclo biologico o soltanto una parte. Alcuni depongono le uova nel terreno, liberamente o in apposite ooteche; altri si approfondiscono nel terreno verso la fine dello stadio di larva per

impuparsi o incrisalidarsi e trascorrere lo stadio di pupa o crisalide; altri stazionano nel suolo per tutto lo stadio di adulto o imago. Senza parlare degli isotteri, come le termiti, e di alcuni imenotteri, come le formiche, che vivono per molto tempo nel terreno, dove scavano gallerie ed a volte costruzioni più o meno complicate, dove stivano grandi quantità di alimento. Ognuno di questi piccoli e numericamente infiniti animali scava, rimuove, rivoltta, trasforma, degrada infinite quantità di terreno e di materia organica che subiscono, così, profonde e continue modificazioni nel profilo fisico e chimico.

Alcuni dei principali esponenti dell'immensa biomassa di individui della pedofauna sono riportati, schematicamente, nelle figure 89 (larve dell'ordine dei ditteri), 90 (adulti e larve dell'ordine dei coleotteri) e 91 (generi e specie dell'ordine degli omotteri, ortotteri, tisanotteri, zoratteri, embiotteri, isotteri, dictiopteri e dermatteri).

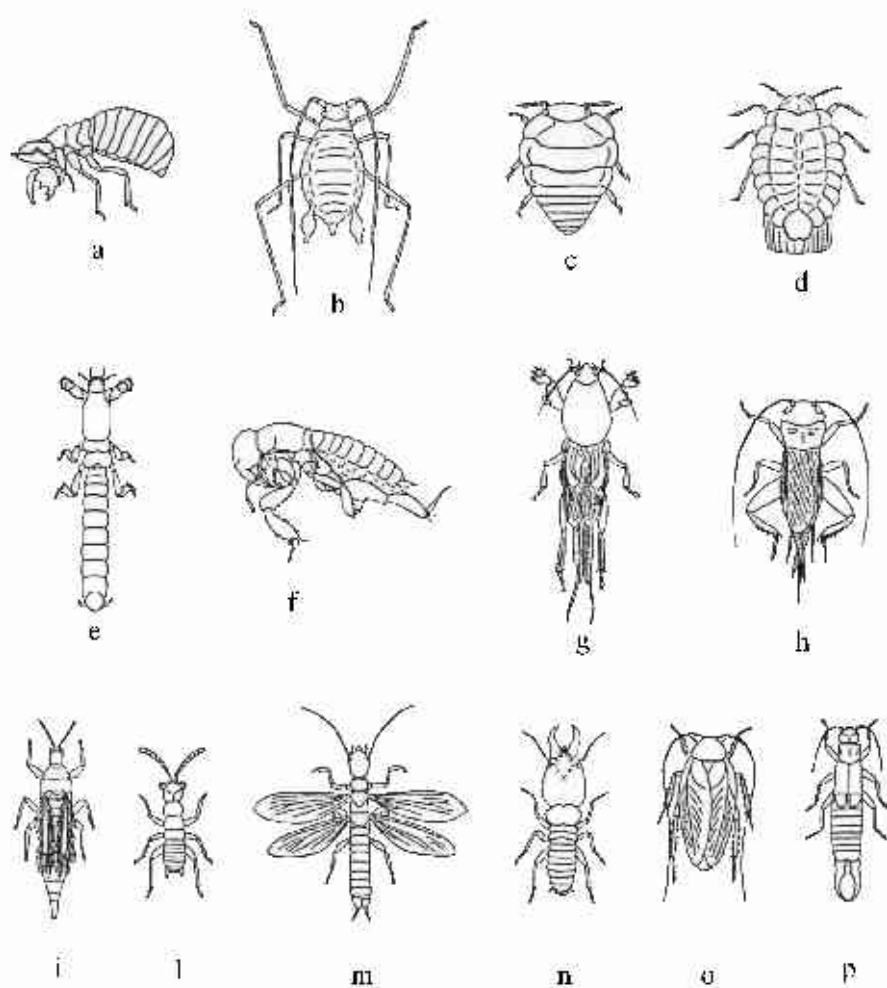


Fig. 91 – Alcuni generi e specie d'insetti appartenenti alla pedofauna dell'ordine Homoptera: a) ninfa del genere *Magicicada*, b) *Rhopalosiphoninus latysiphon*, afide ad habitat terricolo, c) femmina atterra di *Phylloxera vastatrix*, d) *Orthezia*; dell'ordine Orthoptera: e) *Cylindracheta*, f) *Oryctopus prodigiosus*, g) *Gryllotalpa*, h) *Gryllus*; dell'ordine Thysanoptera: i) *Liothrips*; dell'ordine Zoraptera: l) *Zorotypus*; dell'ordine Embioptera: m) maschio di *Embia*; dell'ordine Isoptera: n) soldato di termite del genere *Macrotermes*; dell'ordine Dictyoptera: o) *Ectobius*; dell'ordine Dermaptera: p) *Forficula auricularia* (da Keith e Mc Kevan, 1962).

Tardigrada

I tardigradi terrestri vivono sui muschi umidi, sui licheni e sulle particelle terrose bagnate. Si vedono raramente in gran numero e in un pugno di terra umida o di muschio se ne può trovare qualcuno. Si alimentano principalmente di liquidi, in prevalenza di succhi di piante. Il loro corpo è breve e tozzo, di lunghezza di 0,3-1,5 mm, provvisto di quattro paia di zampe, tozze ed inarticolate, ciascuna provvista di quattro o più unghie o cuscinetti adesivi che sono usate per la locomozione e per mantenersi distaccati dal substrato. I tardigradi hanno la capacità di disseccarsi completamente ed entrare in criptobiosi. Risultano resistentissimi alle temperature estreme ed alla siccità. In prove di laboratorio, sono emersi allo stato criptobiotico e si sono riprodotti dopo esposizioni a temperature comprese tra -250 °C e 150 °C ed hanno resistito agli effetti dissecanti dell'etere e dell'alcol etilico. E' stato stimato che i tardigradi abbiano una vita attiva di 12-18 mesi, possono vivere oltre 50 anni, inframmezzando periodi attivi con lunghi momenti di vita latente e svolgono un ruolo importante nella formazione del suolo.

I tardigradi pungono le singole cellule o il corpo di piccoli invertebrati servendosi di minuti stiletti perforanti retrattili. Il loro apparato digerente è rettilineo ed i prodotti di rifiuto della digestione e dell'escrezione, nonché i gameti, sono espulsi attraverso una cloaca. Filogeneticamente essi sono affini agli artropodi come dimostrano una cuticola rinnovata con il processo di muta, le zampe tenute sotto il corpo, un sistema nervoso metamerico ed un emocele. Le specie *Macrobiotus hufelandi* ed *Echiniscus trisetosus* sono quelle più rappresentative tra i tardigradi. La specie *Hypsibius scoticus* è apparentemente confinata nel terreno. Nella figura 92 è riportato lo schema di una femmina di tardigrado, in cui sono mostrati gli organi interni come apparirebbero se fossero osservati attraverso la parete del corpo dal lato sinistro.

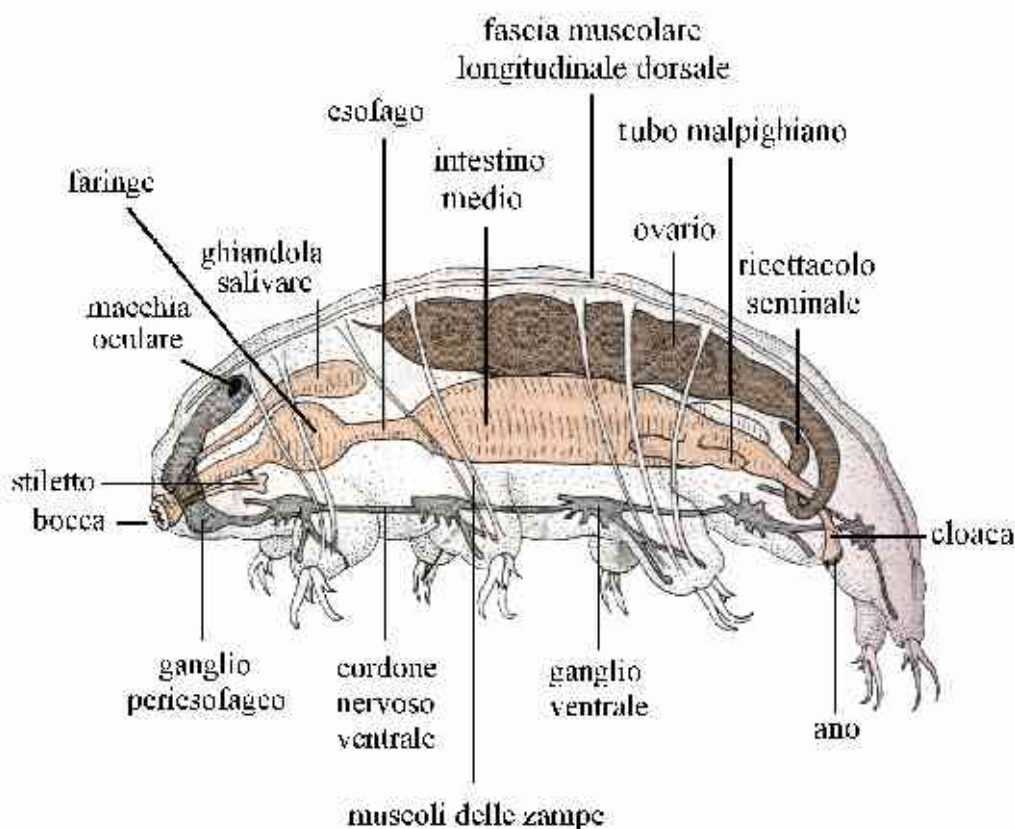


Fig. 92 – Disegno di femmina di tardigrado vista di lato (da Mitchell *et al.*, 1999).

Onychophora

Il phylum *Onychophora* è costituito da individui eruciformi (simili a bruchi), con molte paia di zampe ambulatorie e con apparati interni disposti in segmenti. Circa 80 specie sono incluse tra gli onicofori. Vivono in grotte, sotto i sassi o nella lettiera umida, nelle foreste tropicali e subtropicali dell'emisfero meridionale. Le specie fossili erano marine, molto somiglianti agli onicofori viventi. Gli onicofori sono tutti terrestri.

Gli onicofori sono allungati, lunghi circa 1,5-15 cm, rivestiti di una cuticola chitinoso, molle, flessibile e segmentata (figura 93). La cuticola è rinnovata con il processo della muta, non simultaneamente, come negli artropodi, ma a chiazze. Possiedono da 14 a 43 paia di zampe inarticolate, secondo la specie, un capo con due antenne, una bocca ventrale fiancheggiata da un paio di mandibole atte a lacerare o tritare l'alimento, una papilla orale recante un orifizio con cui sbocca una ghiandola adesiva. Questa secerne un liquido che indurisce rapidamente formando, all'aria, filamenti appiccicosi. Gli onicofori sono capaci di scagliare questo liquido fino ad una distanza di mezzo metro, frustrando i potenziali predatori o catturando prede, rappresentate da piccoli invertebrati, che rimangono intrappolate nei filamenti.

Gli onicofori sono una strana mescolanza di caratteri tipici degli anellidi, degli artropodi ed esclusivi. Le loro zampe somigliano ai parapodi degli anellidi essendo inarticolate, ma somigliano anche a quelle degli artropodi poiché mantengono il corpo staccato dal substrato. Gli organi escretori sono dei metanefridi disposti metamericamente, simili a quelli degli anellidi, associati, ciascuno, ad una zampa ambulatoria, provvisti di un nefrostoma ciliato che raccoglie liquido da un piccolo sacco celomatico che si apre all'esterno con un nefridioporo, alla base della zampa.

Oltre alla loro importanza nella filogenesi, gli onicofori hanno un'interessante distribuzione geografica che chiarisce alcuni punti della storia terrestre. Molte specie, strettamente affini di più generi, sono presenti su continenti separati. Certe specie del genere *Opisthopatus*, per esempio, sono completamente isolate l'una dall'altra, alcune abitano le foreste del Cile, le altre vivono in habitat simili in Sudafrica. Questa distribuzione discontinua di specie strettamente affini prova che il continente africano ed il continente sudamericano erano uniti durante precedenti epoche geologiche (teoria della deriva dei continenti).



Fig. 93 – Un onicoforo del genere *Peripatoides* fotografato in una foresta australiana (a sinistra). Secondo la specie, la cuticola è nera, verde o blu ed il corpo è costellato di tubercoli, come si può osservare, nella foto a destra, esaminando la regione anteriore, vista dal disotto, della specie *Macropерipatus torquatus* (da Mitchell *et al.*, 1999).

Chordata

I cordati abitano tutti i tipi di ambienti acquatici e terrestri. Di circa 47.000 specie viventi incluse nel *phylum Chordata*, circa 2.100 specie sono invertebrati marini filtratori; le rimanenti specie sono vertebrate, in quanto possiedono uno scheletro osseo o cartilagineo.

I cordati hanno simmetria bilaterale e, per la maggior parte, hanno un capo ed una coda ben sviluppati. La simmetria è evidente nella muscolatura del corpo e nello scheletro dei vertebrati. Tutti i cordati hanno quattro strutture che sono caratteri diagnostici del *phylum*: 1) una formazione assile endoscheletrica chiamata *corda dorsale* o *notocorda* che assicura il sostegno longitudinale, almeno durante la vita giovanile; 2) un *cordone nervoso tubolare dorsale*, con un'espressione anteriore rappresentata dal cervello; 3) delle *fenditure branchiali* che funzionano nell'alimentazione per filtrazione o negli scambi gassosi o che si sviluppano in altre strutture (ad esempio i polmoni) nei vertebrati terrestri; 4) la *coda postanale* contenente le estensioni posteriori della corda dorsale e del cordone nervoso.

Il *phylum Chordata* comprende due *subphyla* di invertebrati (i *Cephalochordata* e gli *Urochordata* o *Tunicata*), i quali oltre ad essere privi di vertebre hanno un celoma molto ridotto o ne sono del tutto privi, ed un *subphylum Vertebrata*.

I vertebrati, il gruppo di cordati che ha avuto maggiore successo, presentano una colonna vertebrale con vertebre metameriche ed un cranio. La classe *Mammalia* (mammiferi) comprende animali che vivono nel terreno. Tra questi si ricorda l'ordine *Insectivora* (circa 400 specie), comprendenti i ricci, i toporagni e le talpe, piccoli mammiferi terrestri o semiacquatici, con muso generalmente allungato o assottigliato verso l'estremità, occhi minuti e pelame corto e vellutato. Ciascuno dei quattro piedi ha generalmente cinque dita provviste di artigli. I denti recano tipicamente cuspidi acuminate ed in molte specie i denti incisivi sono ingrossati ed i canini sono ridotti. Gli insettivori sono per la maggior parte notturni, si alimentano voracemente di insetti, lombrichi e di altri piccoli invertebrati terricoli.



Fig. 94 – Alcuni vertebrati, utili all'agricoltura, della classe dei mammiferi, ordine insettivori: il riccio (*Erinaceus europaeus*), ricoperto di aculei (a sinistra), il toporagno (*Sorex araneus*), di 9-10 cm di lunghezza, inclusa la coda (al centro), la talpa (*Talpa europaea*), con occhi nascosti, senza padiglione auricolare e con zampe fossorie (a destra). Si nutrono di insetti, molluschi, piccoli anfibi e rettili ed anche di minuscoli roditori.

All'ordine *Insectivora* (figura 94) appartengono le famiglie solenodontidi (*Solenodon paradoxus*, *Atopogale cubana*), tenrecidi (*Tenrec ecaudatus*, *Limnogale mergulus*, il genere *Setifer*, il genere *Oryzorictes*), potamogalidi (*Potamogale velox*), crisocloridi (*Chrysochloris asiatica*, la talpa dorata del Capo), erinaceidi (*Erinaceus*

europaeus, il riccio), soricidi o toporagni (*Suncus etruscus*, il mustiolo, *Sorex araneus*, il toporagno comune, *Neomis fodiens*, il toporagno d'acqua), talpidi (*Talpa europaea*, la talpa comune, *T. romana*, la talpa romana, *T. caeca*, la talpa cieca, il genere *Scapanus*, la talpa dell'America occidentale, il genere *Scalopus*, la talpa dell'America orientale).

Un altro ordine, importante per le connessioni con la pedofauna, è quello dei *Rodentia* (roditori). E' l'ordine dei mammiferi più grande, con quasi 1.800 specie, caratterizzato dal fatto che la mascella superiore e quella inferiore (mandibola) hanno ciascuna un paio di incisivi allungati, a crescita continua, a forma di scalpello per l'assenza di smalto sulla superficie posteriore. Molti roditori sono onnivori ed alcuni prevalentemente insettivori.

STUDIO ECOLOGICO DELLA PEDOFAUNA

E' stato accennato ai principali raggruppamenti tassonomici che costituiscono la fauna edafica e sono stati dati alcuni elementi per il loro riconoscimento. Sono state anche indicate le preferenze alimentari di questi organismi e si è accennato ad alcune reti trofiche di cui fanno parte, onde comprendere il ruolo della pedofauna nella decomposizione della sostanza organica e nell'evoluzione di un terreno naturale ed agrario.

Lo studio della pedofauna richiede una buona conoscenza delle caratteristiche pedologiche, dei parametri fisici e chimici del terreno, della vegetazione spontanea e coltivata, delle pratiche agronomiche attuate e di tutti gli interventi antropici realizzati. E' necessario tener conto della posizione geografica, dell'altitudine, della pendenza e dell'esposizione del suolo, delle caratteristiche d'uniformità. E' altresì importante conoscere, nel tempo, alcune caratteristiche climatiche, come la temperatura e l'umidità dell'aria, la direzione e l'intensità del vento.

Lo studio della pedofauna può essere di tipo qualitativo o quantitativo, a seconda se è necessario conoscere le singole specie d'animali presenti nel terreno ed il loro rapporto numerico, oppure, più semplicemente, il numero d'organismi animali presenti in un dato campione di suolo, evidenziando la specie più rappresentata. Le dimensioni ed il numero dei campioni di terreno sono in relazione al tipo, alla taglia ed all'uniformità di distribuzione degli animali considerati.

Un primo esame del terreno è rivolto ad individuare gli individui della macrofauna. Tale scopo si raggiunge mediante l'impiego di un setaccio provvisto di maglie di dimensioni opportune che trattiene le parti più grosse di terreno e lascia cadere su di un telo chiaro gli animali che saranno raccolti a vista ed esaminati.

La ricerca di animali dotati di mobilità notturna è attuata in campo ricorrendo a trappole a caduta, imbutiformi ed a pareti lisce, che sono conficcate nel suolo fino all'orlo e contenenti, eventualmente, acqua, esche o fissativi incolori ed atossici, come il glicole etilenico.

L'estrazione della mesofauna da un campione di terreno e successivo riconoscimento può essere attuato ricorrendo a metodi dinamici. Questi consistono nell'applicazione di una sorgente luminosa o di una fonte di calore a campioni di terreno posti in contenitori provvisti di diversi settori, separati da reticelle di differenti dimensioni (figura 95).

Ciò mette in fuga gli animali dalla luce, dal calore e dalla sopraggiunta situazione di progressivo essiccamento e consente la loro raccolta in appositi recipienti contenenti liquidi fissativi, non volatili come, per esempio, una soluzione acquosa di acido picrico.

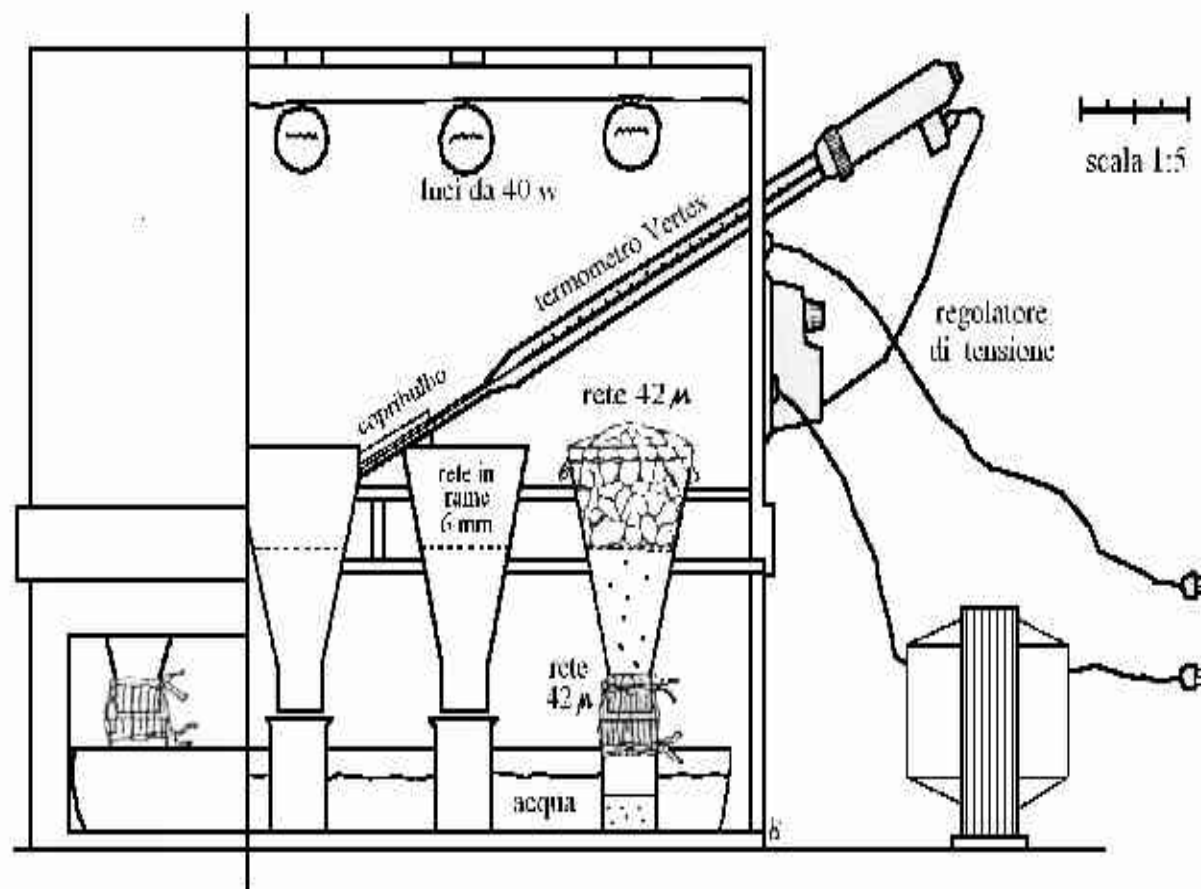


Fig. 95 – Estrattore di tipo Macfadyen modificato per l'estrazione della mesofauna dell'atmobios (principalmente artropodi) con metodi dinamici.

Per gli studi qualitativi, i selettori devono creare adeguati gradienti d'umidità e di temperatura, in relazione alla programmazione delle sorgenti di calore, realizzate mediante un termometro Vertex.

Ogni estrattore deve essere in grado di contenere una serie di campioni, agire in maniera omogenea e consentire l'isolamento del campione.

I metodi dinamici presentano il vantaggio di richiedere una minor quantità di lavoro, di poter intervenire contemporaneamente su tutti i campioni, di ottenere esemplari animali ben conservati per il successivo riconoscimento tassonomico.

I metodi meccanici hanno una resa migliore. Il più noto tra questi è la flottazione, realizzata mediante l'apparato di flottazione di Oostenbrink usato, per esempio, per l'estrazione di nematodi attivi dal terreno.

Esso è composto da una sorta d'imbuto nel quale viene dilavato il terreno attraverso uno staccio e dove la sospensione terrosa subisce una sedimentazione a seguito della quale il materiale più pesante viene separato da quello più leggero, compresi i nematodi.

La sedimentazione avviene ad opera di una corrente idrica ascendente che entra da un'apertura inferiore in quantità costante. Nella figura 96 è riportato lo schema dell'apparato di flottazione di Oostenbrink ed alcune indicazioni circa il procedimento.

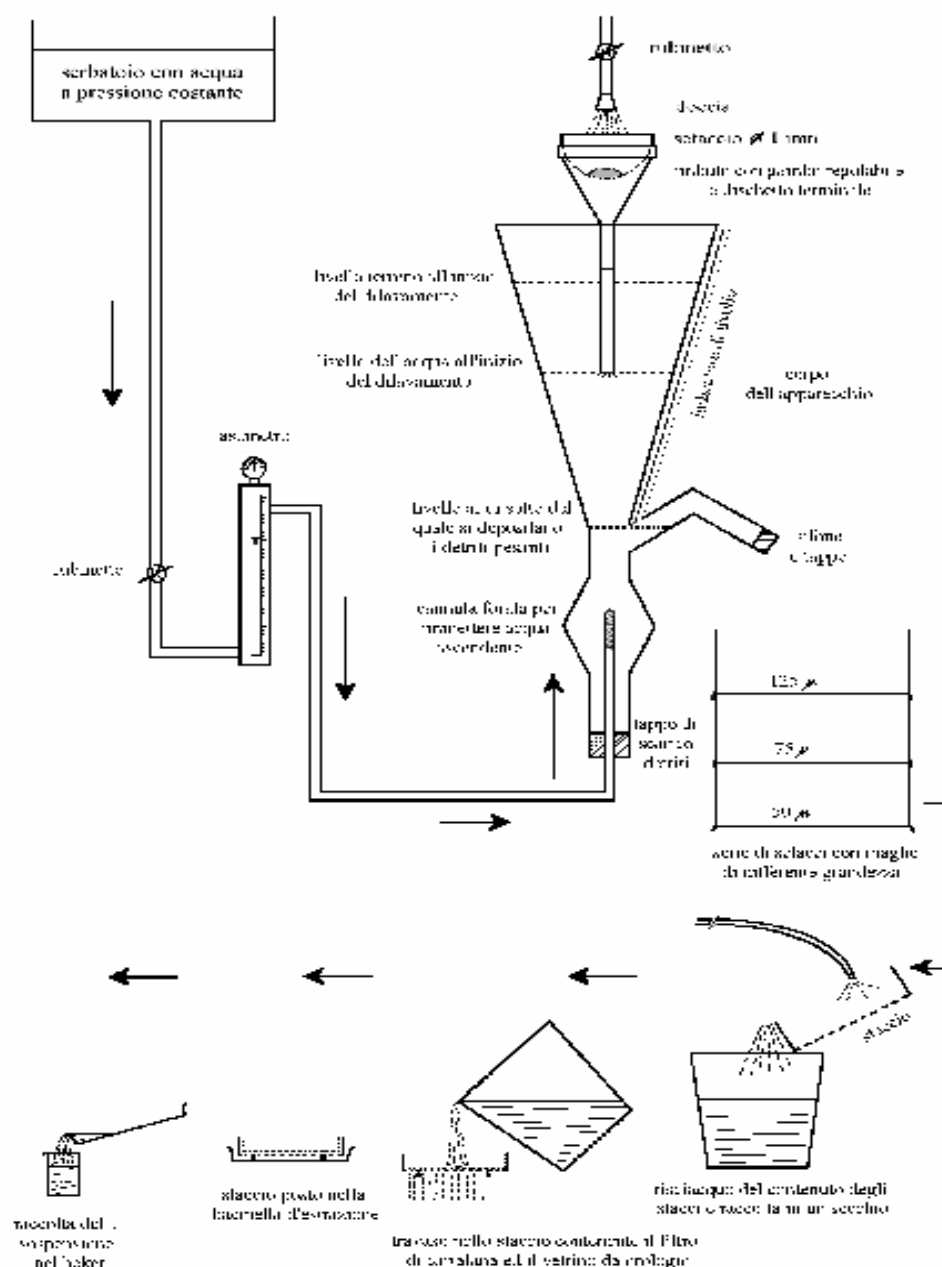


Fig. 96 – Schema dell'apparato di flottazione di Oostenbrink. Immettere l'acqua nel corpo dell'apparato fino all'estremità del gambo dell'imbuto. Aprire la doccia ed il rubinetto in modo che l'asametro segni 800 mL d'acqua per minuto. Riempire tutto l'apparato per dilavare tutto il terreno. Chiudere la doccia e controllare sull'asametro che la corrente d'acqua ascendente sia di 600-800 mL/minuto. Aprire il tappo del sifone e lasciare cadere la sospensione sulla serie di stacci. Sciacquare il contenuto e travasarlo su un setaccio metallico del diametro di 16 cm e con maglie di 175 μ sul cui fondo è stato steso un filtro di cartalana. Lavare con almeno due litri d'acqua di fonte e trasportare lo staccio con filtro di cartalana (sul quale c'è un deposito terroso contenente i nematodi) in una bacinella d'estrazione. Dopo 24 ore togliere lo staccio con i filtri dalla bacinella. Tutti i nematodi attivi saranno passati attraverso il filtro nell'acqua della bacinella. Risciacquare con una spruzzetta il fondo dello staccio, raccogliendo l'acqua nella bacinella e versando la sospensione (che contiene i nematodi liberi) in un beker.

Il metodo dinamico più semplice per lo studio degli animali presenti nell'acqua del terreno è quello che utilizza l'imbuto di Baermann. Si tratta di un comune imbuto di vetro al cui gambo è fissato un tubicino di gomma chiuso da una pinza. L'imbuto è tenuto verticale su un apposito supporto e riempito d'acqua. Il bicchiere, contenente la sospensione del campione di terreno con i nematodi e ricoperto con un pezzo di tela fitta tenuta ferma e tesa mediante un elastico, è posto rovesciato sull'imbuto pieno d'acqua per una notte. I nematodi attivi contenuti nella sospensione del bicchiere passano attraverso il filtro di tela nell'imbuto e si raccolgono in fondo al tubo di gomma. Il giorno successivo, aprendo la pinza, si possono raccogliere i nematodi in una capsula da conta. Nella figura 97 è riportato lo schema dell'imbuto Baermann.

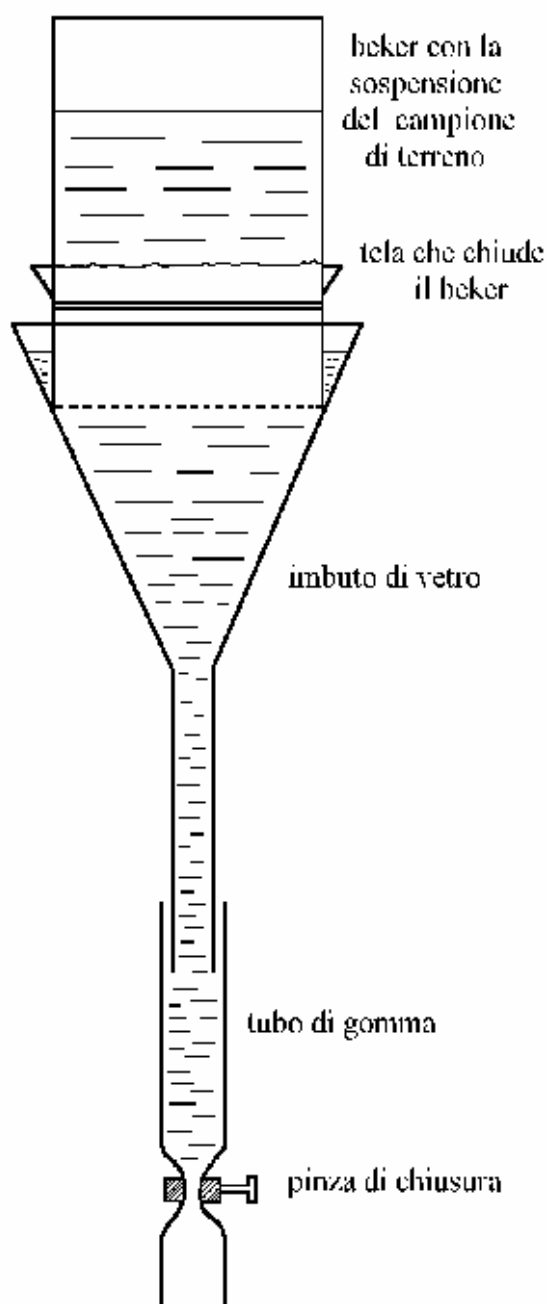


Fig. 97 – Imbuto Baermann per ottenere una sospensione limpida di nematodi (da Talamé, 1972).

Un altro metodo d'estrazione d'animali dal terreno è quello della centrifugazione, basato sul principio della gravità specifica.

Quando si centrifuga una sospensione di terreno, contenente nematodi in una forte soluzione zuccherina, si ottiene che il terreno, pressato sul fondo della provetta, si separa dai nematodi, che tendono a rimanere in alto in sospensione nel liquido.

Il metodo della centrifugazione fornisce ottimi risultati per l'estrazione di nematodi fitoparassiti e predatori ma non per quelli saprofiti che sono estratti in numero molto limitato.

Quello della centrifugazione è il metodo migliore per quanto riguarda il recupero di quelle forme che si muovono poco (nematodi criconematidi) e che non hanno la possibilità di passare facilmente attraverso i filtri di cartalana.

Sempre con riferimento ai nematodi, è possibile separare dal terreno le cisti (i corpi inattivi delle femmine contenenti nel loro interno le uova con le larve) di alcuni generi (ad esempio *Globodera*), sfruttando la proprietà che le stesse cisti hanno di galleggiare nell'acqua. Per riconoscerle, basta versare un campione di terreno in una bottiglia a collo alto oppure in un matraccio e riempire con acqua, mescolando, fino a formare una sospensione. Le cisti, insieme a tutto il materiale organico ed ai detriti leggeri salgono a galla e possono essere raccolte o con un pennellino o travasando la parte superiore della sospensione in un imbuto contenente un foglio di carta da filtro. Il materiale raccolto, una volta asciugato all'aria, si potrà esaminare al binoculare da dissezione. Questo sistema è molto rudimentale e la percentuale di recupero è molto bassa. Il procedimento fornisce migliori risultati se il terreno è prima asciugato all'aria e poi, da questo, si preleva un campione di 50-100 g che è passato in uno staccio con maglie di 175 μ . Lo staccio si pone sotto un getto d'acqua e si dilava fino a che tutto il materiale, che può passare attraverso le maglie, sia passato. Poi, ciò che è rimasto nello staccio è versato con l'aiuto di un leggero getto d'acqua, inclinando lo staccio stesso in una bacinella bianca con i bordi inclinati verso l'esterno. Le cisti e le impurità galleggeranno lungo il bordo della bacinella e saranno visibili ad occhio nudo o con l'aiuto di una lente d'ingrandimento e potranno essere raccolte con un pennellino per la successiva determinazione della specie o per la valutazione delle uova e delle larve vitali.

Per l'estrazione dal terreno di cisti di nematodi cistigeni (ad esempio del genere *Globodera*) si possono impiegare apparecchiature più complesse come l'apparato di Fenwick modificato da Oostenbrink, per il recupero di cisti da terreni secchi, e l'apparato di Seinhorst, per estrarre cisti da terreni umidi.

L'apparato di Fenwick modificato da Oostenbrink (figura 98) è formato da un corpo principale a tronco di cono, su cui poggia un imbuto. Il campione di terreno, posto su un setaccio a maglie larghe poggiato sopra l'imbuto, è convogliato su un piatto inclinato dell'apparato, a seguito di un getto d'acqua di una doccia, e raccolto in uno staccio con maglie di 175 μ .

L'apparecchio è dotato di un'apertura di scarico che serve per la pulizia, una volta terminata l'estrazione. I detriti trattenuti dal setaccio sono raccolti (con pennellino e spruzzetta) sopra una carta da filtro aderente ad un comune imbuto, fatti asciugare ed immessi in un matraccio pieno di acetone. Ciò consente la separazione delle cisti (che vengono in superficie) dai detriti (che precipitano sul fondo), la loro raccolta e l'esame al binoculare.

Se bisogna valutare la vitalità delle uova e delle larve non si effettuerà la separazione con acetone, ma le cisti saranno direttamente raccolte dal filtro sotto il binoculare dopo asciugatura.

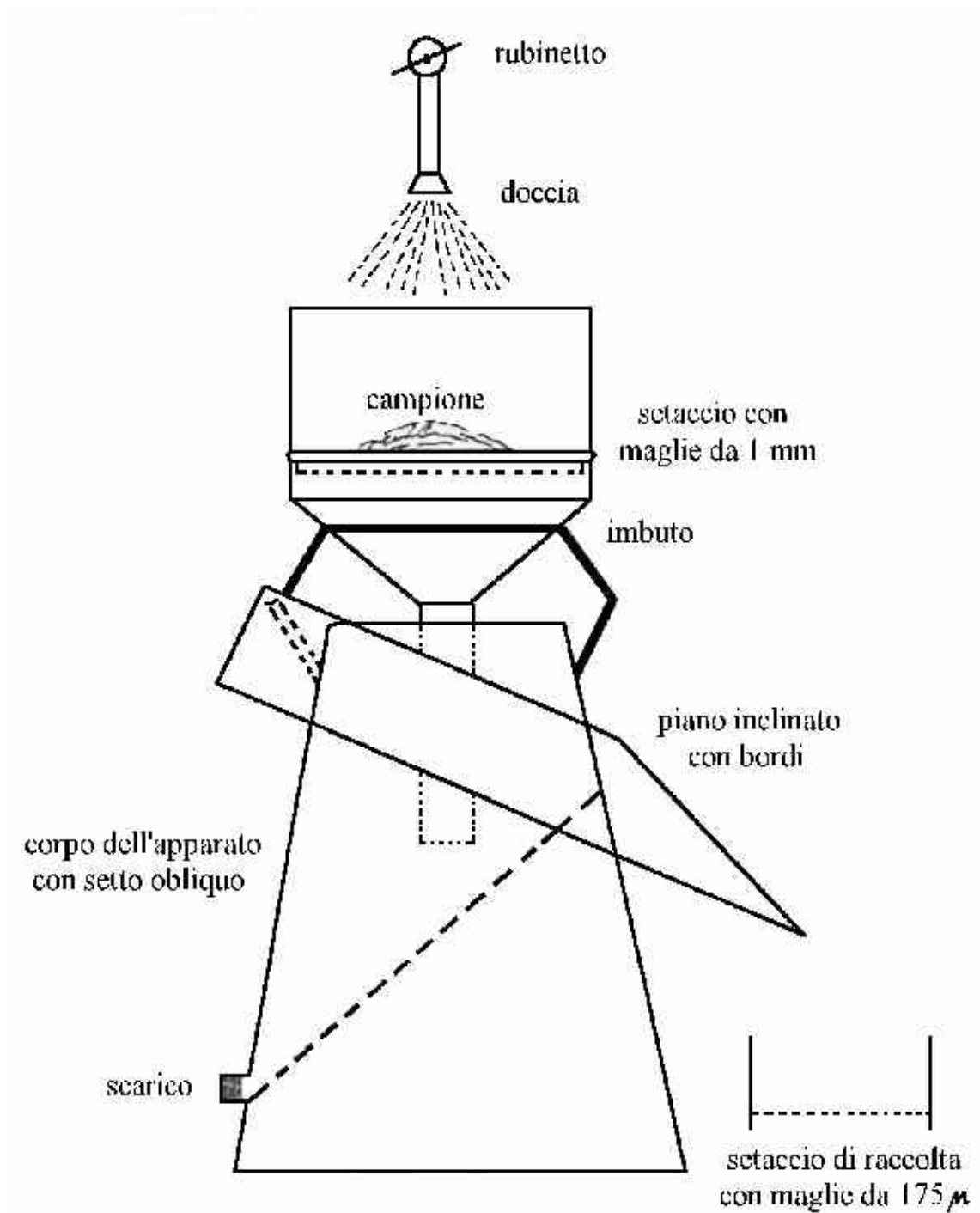


Fig. 98 – Schema dell'apparato di Fenwick, modificato da Oostenbrink, per il recupero di cisti di nematodi del genere *Globodera* di terreni secchi (da Talamé, 1972).

L'apparato di Seinhorst (figura 99) permette il recupero di cisti di nematodi senza la preventiva essiccazione del terreno che, se eseguita in stufa, può compromettere la vitalità delle larve. Il campione di terreno non viene misurato in peso ma in volume e si opera, in genere, su 500 mL di suolo. Il campione di terreno viene posto nello staccio con maglie di 2 mm. Quando l'acqua raggiunge lo staccio si agita per favorire il passaggio della terra e delle cisti contenute. L'acqua che defluisce dai bordi trasporta il materiale galleggiante su uno staccio da 250 µ (o da 100 µ se si devono estrarre cisti molto piccole). Le cisti più pesanti, che sono trattenute nel corpo dell'apparato dalla corrente di

acqua ascendente, vengono raccolte quando si toglie il tappo di scarico e si lascia cadere la sospensione sullo stesso staccio, dopo il dilavamento del campione (2-3 minuti). Il flusso di acqua che viene dal serbatoio deve continuare anche quando si apre lo scarico. Il materiale raccolto nel setaccio viene ulteriormente lavato, trasferito in un setaccio più piccolo e con maglie da 100μ , quindi fatto asciugare all'aria. Le cisti sono poi separate dai detriti con il procedimento all'acetone.

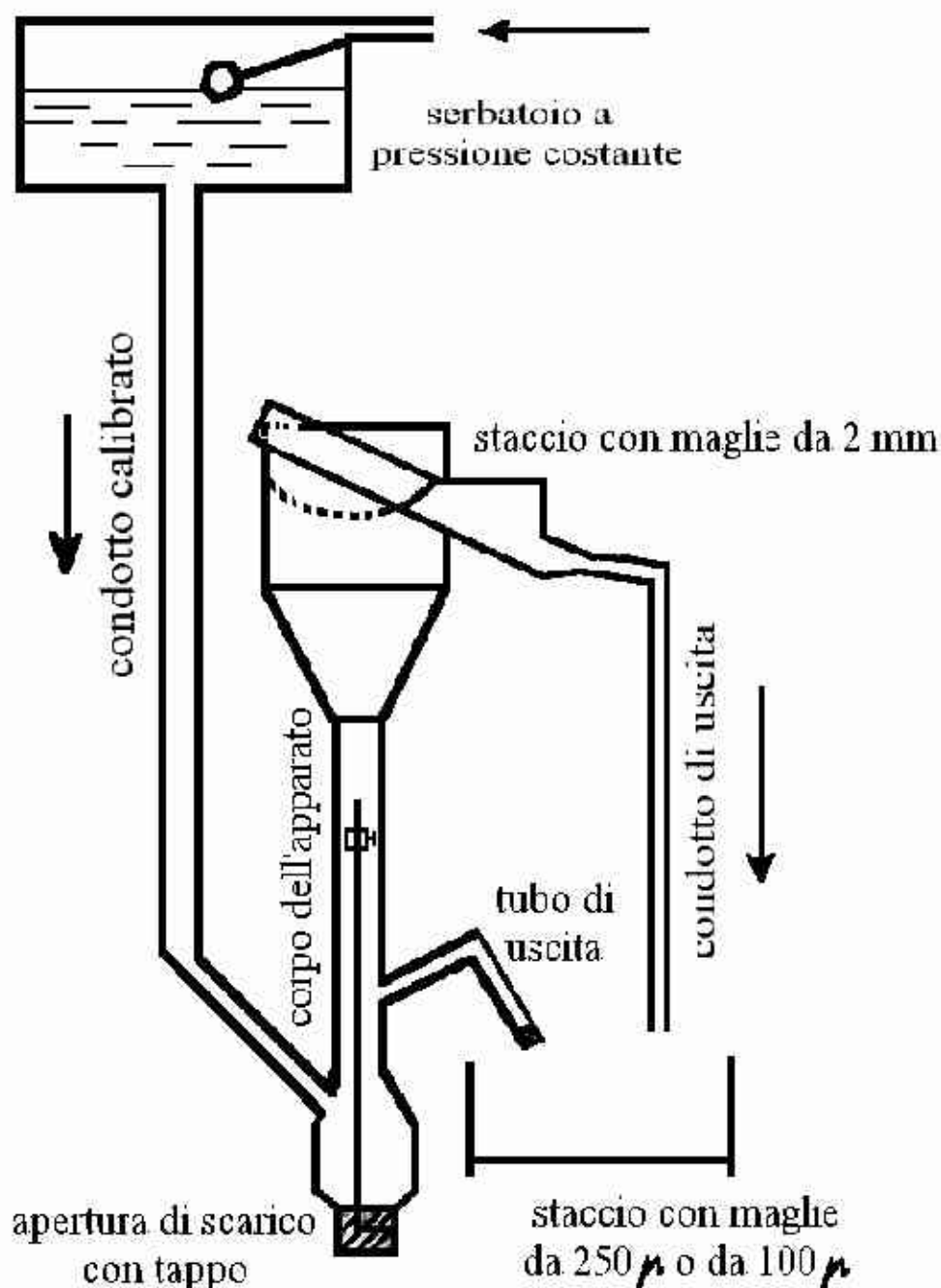


Fig. 99 – Schema dell'apparato di Seinhorst per l'estrazione di cisti da terreni umidi.

Le diverse specie della pedofauna, una volta estratte dal campione di terreno, vengono adeguatamente fissate, ad esempio con formalina al 10%, e possono essere mantenute per molto tempo, in attesa di classificazione, in una miscela di alcool etilico

ad 80° e glicerolo al 5%. Le indicazioni sistematiche finora indicate possono essere utili per una prima classificazione degli animali estratti, ma l'individuazione del genere o della specie, spesso volte, richiede il ricorso agli specialisti del gruppo tassonomico individuato.

Un metodo per individuare i componenti della pedofauna in un certo terreno è quello dei *litter bags*, piccoli contenitori provvisti di pareti costituite da reti le cui maglie sono di differente grandezza. Tali recipienti sono riempiti di materiali vegetali e posti nel terreno. In ognuno dei recipienti potranno entrare soltanto animali di dimensioni uguali od inferiori a quelle delle maglie della rete. Gli animali potranno attaccare il materiale organico contenuto nella *litter bag* ed operare la degradazione della sostanza organica, valutata per via gravimetrica.

La necessità del controllo sugli organismi del terreno e della conoscenza delle loro reciproche interazioni e di quelle con l'ambiente ha privilegiato gli studi di microcosmo, mediante il ricorso a vari metodi. Questi consistono nel prelievo di frazioni di suolo o di lettiera e nell'eliminazione, mediante microonde, raggi gamma, congelamento ed essiccamento ed associazione di biocidi, di tutti gli organismi viventi della fauna e della flora. In tali piccoli ambienti di terreno, resi praticamente sterili, sono introdotti prima i batteri ed i funghi e poi le diverse specie della fauna che si ritengono più adatti per il tipo di studio che s'intende condurre. Si vengono a creare dei veri microcosmi, inseriti nel suolo ed isolati dall'ambiente circostante con reti a maglia più o meno piccola, in rapporto alla grandezza delle specie contenute. Le reti delle pareti di un microcosmo hanno tutte le stesse dimensioni (a differenza delle *litter bags*) e servono ad impedire l'uscita degli animali introdotti e non per selezionare in base alle dimensioni.

Nello studio della fauna del terreno il ricorso al microcosmo è più vantaggioso del metodo del *litter bag* e della semplice defaunazione con sostanze chimiche. Con il *litter bag* con maglie di differente grandezza, può verificarsi che alcuni gruppi animali siano casualmente esclusi. Risulta, poi, difficile stabilire se le variazioni delle popolazioni che si ritrovano all'interno dei recipienti siano dovute a cambiamenti climatici e stagionali oppure alla semplice successione faunistica. Con il metodo dei *litter bags*, le reti delle pareti dei recipienti, essendo di differenti dimensioni, influenzano diversamente i valori igrometrici e di temperatura dei microambienti creati, inducono un differente sviluppo dei microrganismi e causano una differente perdita di frammenti di sostanza organica.

Il metodo della distruzione della fauna in campo con biocidi chimici e successiva reintroduzione di batteri, funghi e di elementi pedofaunistici opportuni presenta anch'esso numerosi svantaggi. In primo luogo non sono ben noti e sono difficilmente controllabili gli effetti sulla microflora del terreno. Esiste, poi, un'assoluta mancanza di conoscenze degli effetti diretti ed indiretti di queste sostanze chimiche sugli organismi non target, vale a dire di quegli organismi che non costituiscono il bersaglio prestabilito.

Lo studio della fauna edafica è di fondamentale importanza per capire il ruolo che essa svolge nei processi di trasformazione che avvengono nel terreno, con riferimento alla regolazione dell'umificazione e mineralizzazione della sostanza organica e nella formazione del profilo pedogenetico. La via da seguire è quella dell'osservazione del materiale vegetale e di altri prodotti organici, dal momento in cui pervengono al suolo, allo scopo di chiarire le modalità di azione ed il ruolo reale dei vari gruppi di organismi viventi. E' possibile seguire e controllare ciascun gruppo di organismi separatamente, in modo di comprendere il loro ruolo nei processi di trasformazione. Oppure è possibile seguire il procedimento inverso, considerando unicamente i risultati dell'interazione dei diversi organismi e cercando di definire il ruolo di ciascuno di essi.

RETI TROFICHE E FATTORI DI REGOLAZIONE DELLA PEDOFAUNA

La conoscenza delle preferenze alimentari degli organismi viventi nel terreno, di cui si è accennato a proposito della descrizione dei principali gruppi tassonomici della pedofauna, e delle catene alimentari di cui fanno parte assume un ruolo fondamentale per la comprensione delle trasformazioni che avvengono nel terreno e dell'evoluzione del profilo pedogenetico. Gli studi condotti in questo campo comportano l'identificazione delle abitudini alimentari della fauna edafica. Ciò può avvenire attraverso attente osservazioni degli animali edafici ed a seguito di accurati esami che includono le analisi del contenuto intestinale degli individui presenti nei campioni di terreno, realizzate nel tempo e nello spazio.

Si ricorda che gli organismi del suolo includono quelli autotrofi che producono sostanza organica ed organizzata, utilizzando come fonte energetica la radiazione solare, a partire da elementi o composti minerali (organismi fototrofi). Questi esseri viventi, normalmente vegetali, producono il nutrimento per una grande schiera di organismi, i consumatori ed i decompositori. Questi sono organismi eterotrofi, incapaci di fabbricare sostanza organica (mancano della fase di organizzazione), ma soltanto in grado di trasformare e di organizzare in cellule e tessuti, in sostanza vivente (organizzazione) i composti organici. I primi sono i consumatori primari, gli erbivori, i quali sono a loro volta fonte di cibo per i consumatori secondari, i carnivori, a loro volta costituenti alimento per i consumatori terziari. I secondi, i decompositori, sono quelli che attaccano i resti e le spoglie dei consumatori una volta morti. Gli eterotrofi si procurano le sostanze organiche già sintetizzate, alimentandosi di altri organismi, ingerendo liquidi o particelle alimentari organiche solide (nutrizione olozoica) o assorbendo sostanze nutritive dall'ambiente (nutrizione saprozoica). Il passaggio sequenziale, dalle piante agli erbivori ed ai carnivori ed agli onnivori, è detto *catena alimentare*. La sequenza degli organismi autotrofi (gli organizzatori del carbonio, dell'azoto, del fosforo, dello zolfo e degli altri elementi minerali) e di quelli eterotrofi (i consumatori primari, secondari e terziari ed i decompositori) costituiscono le innumerevoli catene alimentari pedologiche che determinano la progressiva riduzione energetica dei prodotti organici complessi, ad elevata energia chimica derivata, in definitiva, dall'energia solare.

Come gli uomini spendono il danaro per procurarsi altro danaro, così gli animali devono spendere energia per procurarsi ulteriore energia. I carnivori spendono una parte importante d'energia che è dedicata all'alimentazione nei preliminari della ricerca del cibo (individuazione, inseguimento e cattura della preda), come capita per alcuni coleotteri carabidi e per alcuni acari. Anche gli animali che aspettano che l'alimento giunga fino ad essi devono spendere energia, come si verifica per molti ragni che devono intessere intricate ragnatele per intrappolare gli insetti di cui si alimentano. I predatori possono essere distinti in predatori generici e predatori d'organismi specifici. Tra i predatori generici si trovano nel suolo mammiferi insettivori quali le talpe ed i toporagni, alcuni insetti dipluri e coleotteri, i chilopodi, molti acari ed, in generale, aracnidi, tardigradi, molluschi gasteropodi e turbellari. Tra i predatori specifici si ricordano quelli che si cibano di nematodi e d'insetti.

La preda, una volta catturata, è poi ingerita e prima che la sua energia possa essere utilizzata deve essere demolita, degradata, digerita e convertita in molecole chimiche che possano essere assimilate, vale a dire organizzate in prodotti simili al corpo dell'organismo (cellule, tessuti, organi, apparati). Ciò significa che le particelle alimentari sono degradate, con mezzi fisici ed enzimatici, a molecole relativamente piccole (monosaccaridi, amminoacidi, acidi grassi) che l'animale riesce ad utilizzare come fonti d'energia o come sostanze plastiche con cui costruire le proprie molecole.

Molti animali che vivono nel terreno sono dei consumatori di substrato. L'alimento è prelevato dal substrato o da gallerie scavate a piccole profondità, sotto la superficie. I lombrichi sono i tipici consumatori di substrati ed a differenza di molti consumatori selettivi di depositi, che ingeriscono soltanto sostanza organica, essi sono consumatori non selettivi, aprendosi la strada attraverso il terreno per mezzo di una potente faringe muscolosa che usano per aspirare una miscela di particelle inorganiche del terreno, umidità e sostanza organica parzialmente decomposta. Le sostanze nutritive sono estratte, mentre il residuo ingerito, che rappresenta la maggior parte di quanto è stato assunto, può essere espulso sulla superficie del terreno sotto forma di deiezioni. In questo modo le sostanze nutritive vengono riciclate alle piante ed il terreno viene aerato e subisce un miglioramento nella struttura, con tendenza a costituire quella favorevole struttura glomerulare.

Poi nel terreno vivono i consumatori primari, quelli che si cibano di organismi autotrofi, generalmente detti erbivori. Essi possono essere distinti in macrofitofagi e microfitofagi. In questo gruppo si ricordano alcuni animali che si cibano di cibo particolare ed altri che assumono soltanto fluidi (la linfa delle piante). Tipicamente fitofagi del terreno sono i mammiferi roditori, molti insetti (collemboli), sinfili, tardigradi, una parte di molluschi.

I microfagi comprendono i microfitofagi che si nutrono di alghe, i fungivori ed i batteriofagi e fra questi, molto numerosi, vi sono nematodi, acari, collemboli, coleotteri. Tra questi vi sono quelli che si nutrono di sole parti solide e quelli che assumono soltanto liquidi. I fungivori si nutrono di ife, conidi e spore di microfunghi e possono stimolare la crescita fungina perché asportano le ife senescenti e disseminano, poi, gli organi di moltiplicazione. Questi animali producono escrementi che svolgono un ruolo fondamentale nell'impartire al terreno una struttura agronomicamente favorevole.

Molti microartropodi si nutrono di microrganismi (batteri, funghi), eliminando quelli senescenti e favorendo la dispersione degli altri attraverso l'ingestione, la formazione e l'espulsione delle feci. Ciò rappresenta la dimostrazione della capacità della pedofauna di determinare un vero e proprio popolamento microbico.

Un'altra prova di questo fenomeno è rappresentata dal fatto che il suolo ricco in lombrichi e miriapodi contiene una popolazione batterica e fungina numericamente molto più elevata di quella contenuta nei suoli dove questi animali sono completamente assenti. Gli animali edafici, in particolare i collemboli, coadiuvano la diffusione dei propaguli fungini attraverso il trasporto passivo sul loro corpo ed alcuni acari eterostigmati raccolgono e trasportano le spore dei microrganismi in sporoteche, appositi contenitori presenti sugli arti.

I diversi gruppi tassonomici di microfagi hanno una diversa velocità d'assunzione dell'alimento, durata del ciclo vitale e permanenza dell'alimento nel tubo intestinale. Così, gli acari oribatei hanno lunghi tempi di sviluppo e bassa velocità di assunzione del cibo, mentre i collemboli crescono e si nutrono con grande rapidità. I microfagi che assumono soltanto liquidi lasciano intatta l'architettura del materiale trofico, animale o vegetale che sia, non influenzano in modo importante la struttura del suolo e gli escrementi, principalmente liquidi che essi producono, possono essere prontamente disponibili per la microflora del suolo.

Gli animali saprofiti si nutrono di sostanza organica in decomposizione. Essi sono detti anche detritovori e fra questi sono annoverati molti insetti, diplopodi, oligocheti, molluschi, rotiferi ed acari.

Naturalmente, essi ingeriscono anche grandi quantità di batteri ed altri microrganismi, influenzando, così, enormemente i livelli quantitativi delle popolazioni

delle diverse specie di organismi viventi nel suolo.

Gli animali onnivori che vivono nel terreno sono numerosi e molti acari e collemboli, quasi sempre microfitofagi, possono cibarsi di nematodi ed altri piccoli invertebrati, come pure molti acari predatori si cibano di microalghe e di funghi, mentre alcuni nematodi si cibano di alghe, batteri e di altri nematodi. Molte amebe sono capaci di fagocitare batteri, funghi e diverse specie di protozoi.

Lo studio degli organismi onnivori del terreno ha consentito la loro distinzione in quattro differenti tipologie.

Una prima tipologia comprende gli onnivori che si alimentano di detriti (sostanza organica in disfacimento) e di organismi detritivori (ad esempio alcuni collemboli che sono saprofiti e si nutrono, fra l'altro, di microfunghi). Essi usano, pertanto, lo stesso canale energetico, ma differenti livelli trofici.

Una seconda tipologia include gli onnivori che si nutrono di organismi a diverso livello trofico come alcuni acari che predano nematodi e si nutrono anche di funghi saprofiti.

Un terzo tipo di onnivori è rappresentato da quelli che si nutrono di organismi a differente livello trofico, potendo entrare in competizione con una o più di queste categorie nella ricerca del cibo. E' il caso di certi acari che si nutrono di funghi e predano nematodi, i quali a loro volta, si cibano degli stessi funghi. Si stabilisce, così, una competizione tra i due gruppi di animali riguardante, per l'appunto, la ricerca degli organismi vegetali.

Un'ultima tipologia di onnivori, infine, comprende predatori polifagi che predano animali di differenti livelli trofici, come accade per certe specie di acari che si alimentano di nematodi entomofagi, fungivori, fitofagi ed onnivori.

Uno spiccato e vario eterotrofismo si riscontra nei protozoi conducenti vita libera, i quali si nutrono di molte specie della microfauna, fagocitano materiali organici vari, comportandosi da veri detritivori, manifestano spesso parassitismo, commensalismo, predazione ed a volte fenomeni di cannibalismo, essendo capaci di inglobare individui della stessa specie.

Un gruppo di animali del suolo molto studiato, per i rapporti di parassitismo che instaurano con le piante coltivate, è rappresentato dai nematodi. Ma soltanto una piccola porzione di specie è in realtà dannosa alle piante, mentre la parte più numerosa conduce vita libera e si nutre di minuscoli detriti e di succhi cellulari e preda altri organismi. Gli enchitreidi sono principalmente fungivori e detritivori. I pauropodi sono predatori secondo alcuni, fungivori o detritivori secondo altri. I proturi sono fungivori ed assumono liquidi dalle ife fungine, comprese quelle delle micorrize. Gli acari ed i collemboli, i microartropodi più rappresentati nel terreno, sono predatori carnivori e spesso sono in competizione tra loro. Alcuni acari sono predatori di collemboli. In moltissimi casi i collemboli e gli acari mostrano caratteristiche onnivore.

L'esame del contenuto intestinale del collembolo *Orchesella villosa* ha messo in evidenza materiale inorganico (cristalli di vari tipi rivestiti da veli batterici) ed organico (esuvie).

La presenza di tracce d'esoscheletro nel tubo intestinale dei collemboli fa ritenere che questi animali ingeriscono le proprie esuvie larvali, dopo la muta, o quelle d'altri animali, dimostrando, così, comportamenti di predazione o di necrofagia. Sono stati trovati anche nematodi, ingeriti come uova o larve, schiuse e cresciute nell'intestino. Frammenti di foglie e granuli di polline rappresentano la maggior parte del materiale intestinale esaminato dopo la dissezione degli insetti.

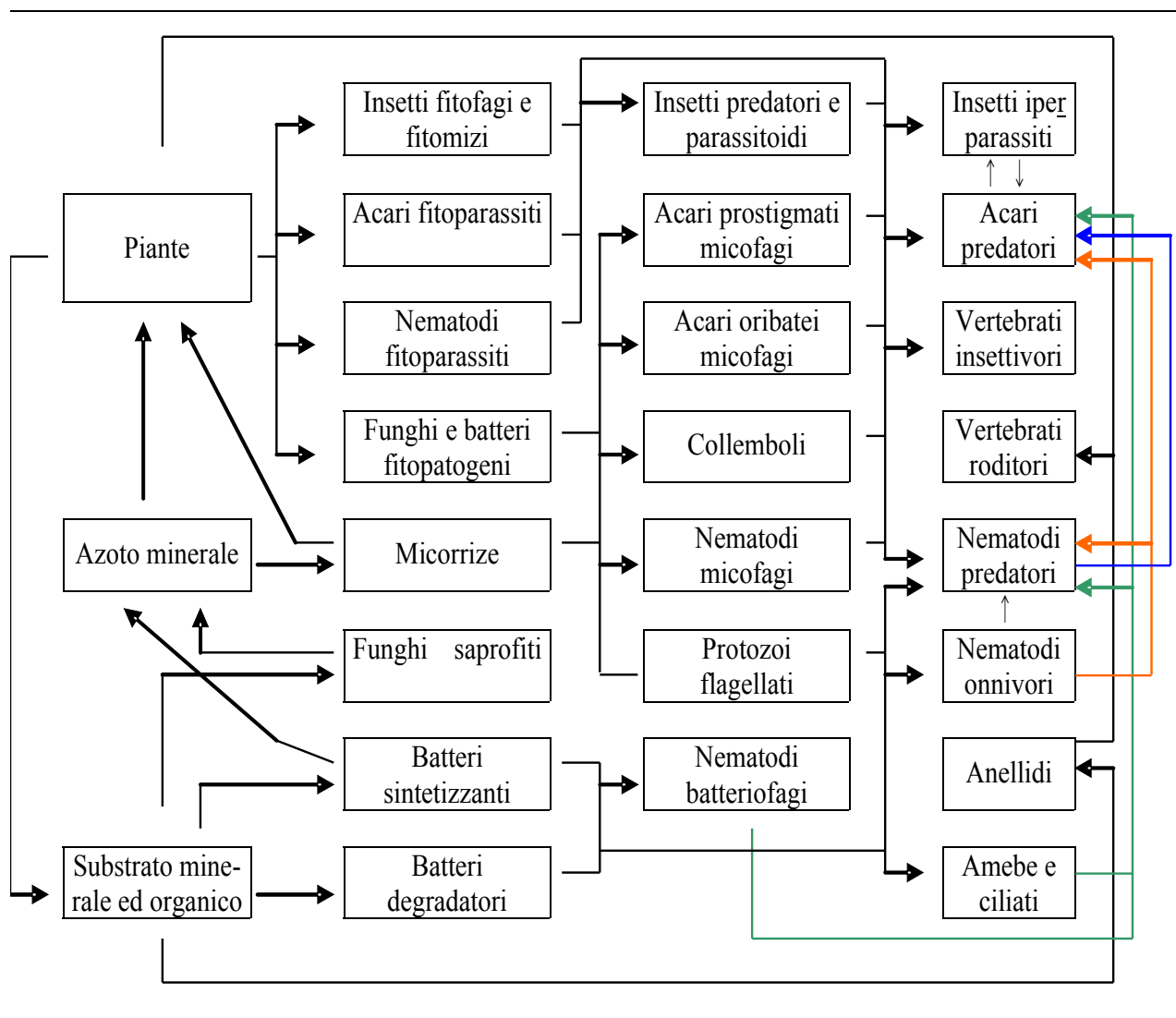


Fig. 100 – Esempio di rete trofica del terreno.

La tessitura del terreno, la grandezza dei pori, il tipo di sostanza organica influenza le dimensioni delle specie di collemboli. Le specie di maggiori dimensioni vivono in terreni con pori più voluminosi, nei quali le ife fungine possono abbondantemente svilupparsi e rappresentare un lauto nutrimento. I collemboli più piccoli occupano terreni con pori di piccole dimensioni dove la biomassa di ife fungine è più ridotta. I terreni con pori più grandi hanno sostanza organica sottoposta ad elevata velocità di decomposizione, mentre in quelli con piccoli pori accade il contrario. Di conseguenza le disponibilità alimentari per gli animali sono differenti nei due terreni e diversa risulta il contributo alla mineralizzazione ed alla costituzione di un determinato profilo pedologico. Le specie di collemboli di piccole dimensioni danno un piccolo contributo al processo di mineralizzazione, ma influenzano di più la formazione di complessi organo-minerali, dato che nel loro intestino viene ben mescolata la sostanza organica con le particelle minerali, poiché ingeriscono più sostanze umifere e minerali per cibarsi dei batteri in esse contenuti. Le specie di maggiori dimensioni favoriscono lo sviluppo dei funghi nei pori di terreno più voluminosi, dispongono di materia organica di più recente

formazione e, pertanto, causano un più elevato grado di decomposizione e di mineralizzazione.

Globalmente l'intero ecosistema del suolo è attraversato da un flusso di energia, legato ai diversi livelli trofici, i quali sono tra loro collegati ed interagenti e vanno a costituire la rete trofica del suolo (figura 100).

Il flusso energetico è dato dalla sommatoria delle interazioni biotiche allo stesso livello trofico oppure a livelli differenti (predazione, fitofagia, simbiosi mutualistica). La regolazione dell'ecosistema dipende dal numero di specie compresenti (ad esempio il sistema è tanto più stabile quanto più elevato è il numero di specie) ma, soprattutto, dall'influenza che ogni organismo esercita sugli altri organismi con i quali interagisce. Ad esempio, l'energia acquisita dai collemboli deriva da molti livelli trofici fra cui il substrato organico, le alghe, i funghi.

Lo studio sulle reti trofiche del suolo e le loro interazioni assumono un'importanza fondamentale nella suddivisione degli individui in gruppi funzionali: predatori, parassiti e parassitoidi, fitofagi, fitomizi, microfagi, detritovori ed onnivori.

La pedofauna cambia quantitativamente e qualitativamente in relazione al tipo di terreno. In un terreno forestale e boschivo, la maggior parte degli animali è presente nella lettiera e la loro densità cala bruscamente man mano che si procede negli strati più profondi. Nei terreni a pascolo la pedofauna è concentrata nei primi 5 cm di profondità ed in particolare nel materiale organico alla base delle piante e fra le radici. Nei campi coltivati la fauna edafica è distribuita uniformemente nei primi 15 cm di terreno. Nei terreni coltivati ad ortaggi la fauna edafica è in rapporto alle concimazioni organiche ed al tipo di prodotto organico somministrato che può essere diverso a seconda se trattasi di un'orticoltura industriale o di orti familiari. Gli artropodi, specificatamente diversi acari, molte larve d'insetti, alcuni collemboli, diplopodi e chilopodi vivono prevalentemente in superficie. Altri diplopodi, chilopodi, acari, insetti (carabidi, scarabeidi, larve di elateridi, proturi e collemboli) si ritrovano ad una profondità maggiore. Sinfili, pauropodi, dipluri penetrano nel terreno a profondità di alcune decine di centimetri. Collemboli ed acari si trovano, occasionalmente, a maggiori profondità.

Gli interventi antropici semplificano notevolmente un ecosistema naturale, perché riducono le specie animali e vegetali compresenti (con i trattamenti antiparassitari e il diserbo), tanto da favorirne spesso una soltanto (monocoltura) accentuando, così, l'instabilità del sistema. Nei terreni boschivi e prativi si stabiliscono, nel tempo, complessi equilibri tra le diverse componenti biotiche ed abiotiche, che rimangono indisturbati nel lungo periodo. Negli agrosistemi, i continui disturbi di tipo meccanico, fisico e chimico agiscono sulle componenti ambientali biotiche ed abiotiche degli organismi decompositori ed i loro effetti interagiscono con i cicli fenologici degli organismi animali e vegetali. Nei terreni coltivati il sistema è semplificato e disturbato dalle varie pratiche agronomiche, le quali si completano con l'asportazione di ingenti quantità di materia organica che è quella che va a costituire la produzione agricola.

Gli interventi dell'uomo realizzati attraverso le pratiche agricole, spesse volte sconsiderate, influenzano il popolamento animale del suolo: è stato calcolato che gli artropodi presenti in un metro quadrato di prato permanente oscillano da 75.000, alla profondità di 15-30 cm, a 180.000, in superficie fino a 15 cm, mentre quelli presenti, fino a 20 cm di profondità, in un campo mantenuto arato sono 16.000 se non sono effettuate concimazioni minerali, 18.000 se sono applicati concimi minerali e 34.000 se sono somministrate concimazioni a base di letame.

L'aratura è un'operazione colturale che influenza moltissimo la fauna del terreno. Il rovesciamento e la compressione delle zolle possono danneggiare o intrappolare gli

animali. Il rapido essiccamento dello strato superficiale e l'assenza di vegetazione, conseguenza delle lavorazioni, possono privare la pedofauna d'acqua e di cibo.

Alcuni animali, tuttavia, possono trarre vantaggi dall'aratura e dalle concimazioni che seguono, perché sono privati dei loro predatori e svilupparsi numericamente e possono trovare una maggior quantità d'alimento a seguito della più elevata densità di batteri e funghi, quale conseguenza delle migliori condizioni nutrizionali del terreno.

La pratica della concimazione organica e minerale del suolo influenza notevolmente la pedofauna, con effetti differenziati sulle popolazioni edafiche.

I concimi organici favoriscono l'incremento della densità e della variabilità qualitativa pedofaunistica, sia perché aumentano la disponibilità di alimento, sia perché è introdotto un differente tipo di cibo che può favorire lo sviluppo di determinate specie di animali a scapito di altre.

La composizione qualitativa della pedofauna subisce una profonda modificazione durante il processo di degradazione della sostanza organica, mostrando, oltre ad un aumento del numero totale degli individui anche una variazione della dominanza della densità dei vari gruppi tassonomici animali.

Inizialmente, i ditteri ed i coleotteri coprofagi e predatori colonizzano il materiale organico dove causano, insieme all'azione dei microrganismi, una prima e profonda modificazione chimica che consente l'intervento di animali tipicamente edafici, non coprofagi, ma associati alla decomposizione della sostanza organica, come i collemboli.

Va anche detto che i concimi organici possono contenere metalli tossici come l'arsenico, il cadmio, il rame, il piombo, il mercurio e lo zinco e composti chimici come l'acido benzoico, i fenoli, l'ammoniaca, i solfuri ed il metano. Questi possono contaminare il suolo e modificare le caratteristiche chimico-fisiche, causando danni più o meno gravi alla pedofauna.

L'applicazione di concimi minerali al terreno produce un minor effetto, tuttavia evidenziabile per l'aumento di popolazione dei detritovori, dei microrganismi e dei loro consumatori. Ciò è dovuto ad un effetto indiretto degli elementi minerali che, favorendo lo sviluppo delle piante e delle loro radici, inducono un aumento della sostanza organica. I fertilizzanti inorganici, tuttavia, se somministrati in dosi eccessive, possono causare salinità o modificare il pH nel terreno, con conseguenze negative sulla quantità e qualità della pedofauna.

La somministrazione di antiparassitari, come gli insetticidi, i nematocidi, i fungicidi, gli erbicidi e diserbanti, è una pratica agronomica che può manifestare effetti negativi sulla pedofauna, perché questi prodotti sono costituiti da composti chimici biologicamente attivi i quali possono manifestare azioni deleterie, non soltanto sugli organismi bersaglio ma anche su altri esseri viventi. La pedofauna può subire un danno diretto dalla somministrazione di queste molecole tossiche, ma anche indiretto, a seguito della diminuzione di cibo, conseguenza dell'eliminazione dei vegetali, animali, microrganismi, materiale in decomposizione e dell'alterazione del rapporto tra i diversi antagonisti.

La presenza della vegetazione naturale o delle piante coltivate agisce beneficamente sulla pedofauna, poiché esplica un'azione di protezione, migliora le condizioni microclimatiche, rappresenta una fonte di nutrimento e di energia.

Il materiale vegetale senescente, caduto al suolo ed in fase di decomposizione, rappresenta una fonte di cibo diretta per gli animali detritovori ed indiretta per gli animali microfagi, poiché incrementa la densità dei microrganismi decompositori, di cui costituiscono il nutrimento.

Il tipo di coltivazione influenza anch'esso la pedofauna. La monocoltura semplifica l'agroecosistema, sia perché privilegia una sola specie vegetale e persegue tutte le altre, sia perché elimina tutti gli animali associati alle piante momentaneamente escluse. La rotazione colturale ha fatto registrare effetti contrastanti sulla pedofauna, mostrando in alcuni casi effetti favorevoli sulla composizione qualitativa e sulla densità delle popolazioni, in altri dando luogo al fenomeno opposto. Va anche detto che la monocoltura può favorire lo sviluppo di una sola specie di animale, quella legata alla stessa coltivazione, tanto da renderla nociva alle stesse piante coltivate, le quali possono essere massivamente attaccate e completamente distrutte.

Altre pratiche agronomiche come l'irrigazione, il drenaggio e quelle che migliorano le condizioni d'abitabilità, aumentando la produzione agricola, esplicano un'azione benefica anche sulla pedofauna. La maggior parte della fauna del terreno è di tipo mesofilo, piuttosto che xerofilo o idrofilo. Pertanto, condizioni del suolo non siccitose o eccessivamente umide e prive di ristagni idrici sono favorevoli alla pedofauna.

Gli effetti degli interventi antropici in agricoltura sulla fauna edafica sono sintetizzati nella figura 101.

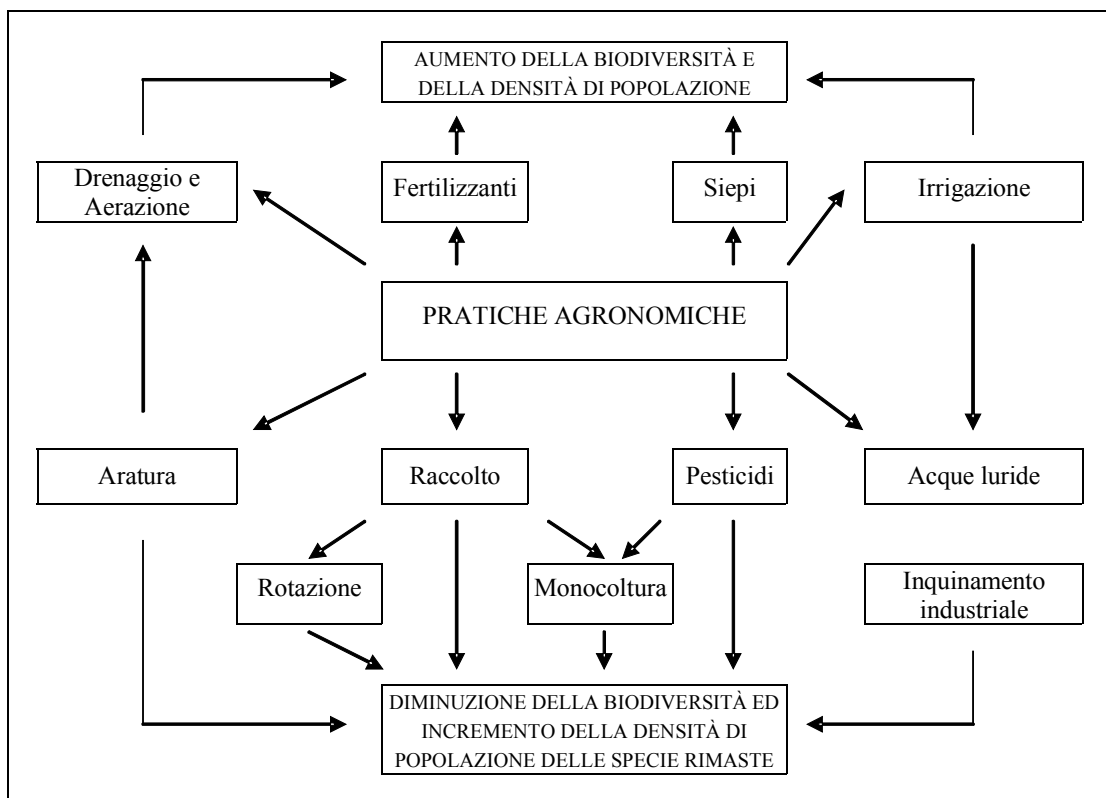


Fig. 101 – Variazione della biodiversità pedologica indotta dagli interventi antropici in agricoltura.

Le diverse popolazioni delle varie specie d'organismi del terreno non sono isolate, ma vivono associate in comunità. Per ogni specie si registrano, nel tempo e nello spazio, delle fluttuazioni che originano la *dinamica delle popolazioni*. Il numero di individui di una popolazione, impercettibile o rimarchevole, intorno ad una *posizione di equilibrio* o *densità media* non cambia mai bruscamente, a meno di profonde modificazioni del

complesso dei fattori di regolazione che costituiscono l'*equilibrio naturale*. L'interferenza dei fattori *abiotici*, quali le condizioni d'abitabilità del suolo, e *biotici*, cioè gli organismi edafici di varia natura, con le popolazioni di una specie causa una resistenza (*ecoresistenza*) sul loro sviluppo e ne determina il *controllo* o *regolazione naturale*, correlato ai fattori di mortalità, dipendenti o indipendenti dalla densità.

Gli agenti biotici inducono un'azione regolativa delle popolazioni delle specie edafiche che è definita *controllo biologico naturale*. Un idoneo equilibrio biologico può essere anche ottenuto mediante adeguati interventi antropici, aventi come obiettivo il contenimento di organismi dannosi (ad esempio i parassiti delle piante) o l'incremento di quelli utili. Sono questi i concetti basilari della *lotta biologica* o *controllo biologico*, di grande interesse nella difesa fitosanitaria, la cui applicazione pratica ha lo scopo di contenere, al di sotto di soglie di dannosità economica, quelle popolazioni di organismi dannosi mediante l'impiego di agenti biologici, con l'obiettivo di ridurre le perdite di produzione e conservare le qualità ambientali. Le *biotecniche* consistono, invece, nell'uso di sostanze naturali o di sintesi (ormoni, feromoni ed altre macromolecole), di mezzi fisici, chimici e di manipolazioni genetiche che possono alterare il comportamento naturale di determinate specie dannose rendendole inoffensive o meno pericolose o possono incrementare la densità di popolazioni edafiche utili.

Nel terreno ciascuna specie è diffusa in un proprio *areale*, formato da vari *biotopi* o ambienti fisici.

Ogni specie è parte integrante di uno o più *ecosistemi*, vale a dire di un insieme d'organismi che interagiscono con l'ambiente.

L'*ecosistema* è un'unità ecologica funzionale comprendente parti viventi e non viventi che interagiscono per dar luogo ad un sistema stabile dove lo scambio dei materiali avviene in una struttura chiusa e, pertanto, secondo un ciclo.

In ogni ecosistema si realizza un trasferimento di energia nei diversi tipi di rapporti trofici costituenti le catene alimentari le quali, interagendo tra loro, costituiscono una rete trofica.

Gli organismi vegetali ed animali vincolati ad un determinato ecosistema ne costituiscono la *biocenosi*.

In certe condizioni ambientali, lo stato funzionale di una specie e non semplicemente il suo stato fisico è definito *nicchia ecologica*, vale a dire un determinato volume spaziale e temporale, a molte dimensioni, determinato dalla sommatoria di tutte le interazioni di un organismo e del suo ambiente, abiotico e biotico.

Una nicchia ecologica può essere occupata da una sola specie o da più specie omologhe. In quest'ultimo caso, l'eventuale competizione che ne discende può essere causa di sostituzioni complete e conseguente estinzione della specie sopraffatta dalle altre.

Un altro aspetto molto importante nella regolazione degli organismi del terreno è l'*omeostasi*, cioè la tendenza dei sistemi viventi a mantenere la stabilità, sia con riferimento all'individuo, sia ad una popolazione o ad una comunità biotica, mediante autoregolazione.

La stabilità di un sistema edafico è assicurata se la complessità delle specie coesistenti, vale a dire la *biodiversità* del sistema, è molto elevata, poiché le risposte alle variazioni ambientali, che possono verificarsi, mostreranno maggiore adeguatezza ed adattatività.

Le popolazioni edafiche d'individui totalmente o parzialmente interfeconde (rispettivamente *specie* e *semispecie*) possono differenziarsi da un punto di vista

morfologico, biologico ed ecologico. Individui della stessa specie, pertanto, possono mostrare diverse caratteristiche fisiologiche (*biotipi*) ed ecologiche (*ecotipi*). Tuttavia, non sempre è possibile dimostrare se le popolazioni viventi nel suolo sono o meno riproduttivamente isolate, poiché una delle variazioni più frequenti in molti organismi invertebrati può essere il differente tipo di riproduzione, anfigonico (sessuato) o partenogenetico (asessuato).

Le fluttuazioni di popolazione, il cui studio è affrontato nell'ambito di una scienza che prende il nome di *demoecologia*, si verificano frequentemente nella pedofauna e determinano variazioni della densità spaziale e temporale anche in quelle popolazioni apparentemente costanti.

Gli animali del terreno, pertanto, possono costituire delle popolazioni a densità costante (quegli animali infeudati in un determinato areale ed adattate in condizioni, biotiche ed abiotiche, costanti per un dato profilo pedologico), delle popolazioni a fluttuazioni annuali (in genere, animali fitoparassiti che, in presenza delle radici di piante annuali, aumentano il loro numero, per l'abbondanza di cibo disponibile e, successivamente, decrescono, durante l'intervallo tra una coltivazione e la successiva), delle popolazioni a gradazioni (quelle di animali che parassitizzano le radici di colture poliennali, come quelle arboree e forestali, che presentano, in più anni, una fase di *superaccrescimento* o *gradazione*, a cui segue quella di *superdecremento* o di *retrogradazione*).

Le diverse specie di animali del suolo hanno una diversa capacità competitiva. Tale capacità è espressa dalla media della progenie sopravvissuta al termine di una generazione. E' questo il concetto di *fitness* che dipende dalle caratteristiche riproduttive della specie. Alcune presentano un elevato potenziale riproduttivo, un'alta fecondità ed un ciclo biologico rapido e relativamente breve. Altre specie sono caratterizzate da una riproduzione più lenta e vivono più a lungo. La *fitness* dipende anche dalle condizioni ambientali, tanto che l'areale di una specie presenta una zona nella quale essa trova le condizioni più favorevoli di sviluppo. Quest'area è denominata *zona sinecologica ottimale*.

Lo studio e l'approfondita conoscenza di questi aspetti, riguardanti le condizioni biotiche del terreno, assume un'importanza fondamentale per il miglioramento delle funzioni d'abitabilità, di nutrizione ed ecologica del suolo.

Gli interventi biologici, realizzati per ottimizzare le condizioni edafiche, sono invocati a gran voce e questo tipo di biotecnologia sta vivendo, oggi, una popolarità che non si è avuta neppure alla fine dello scorso secolo, quando iniziarono, con enorme successo, i primi interventi di controllo biologico in agricoltura.