

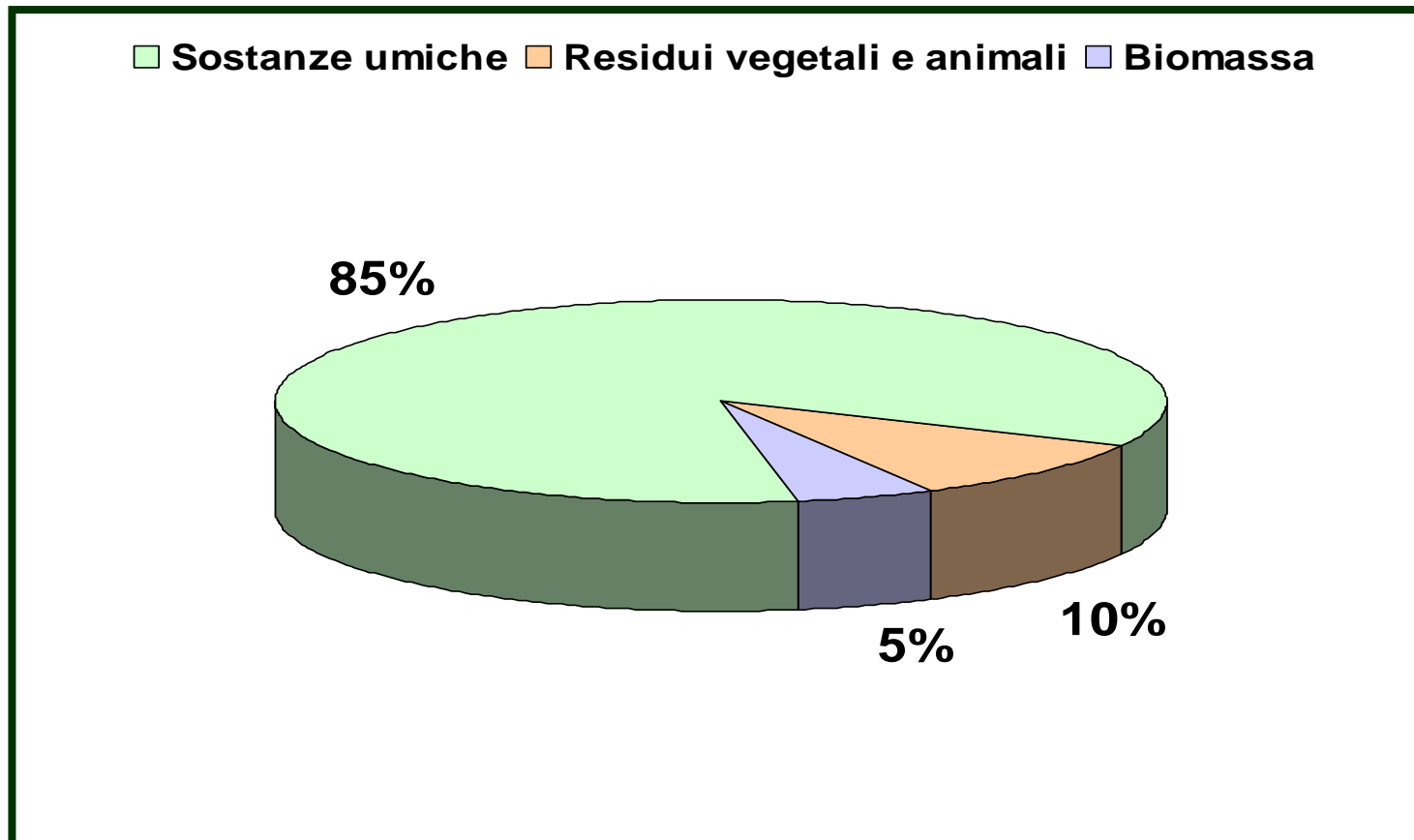
La sostanza organica

La costituzione della sostanza organica

Partecipano alla costituzione della sostanza organica del suolo:

- **i residui vegetali e animali parzialmente decomposti e in via di trasformazione**
- **la biomassa degli organismi viventi caratterizzanti le comunità edafiche**
- **i materiali di neogenesi, di natura complessa e di struttura chimica ancora non ben definite, genericamente indicati con il nome di sostanze umiche.**

Per convenzione i residui vegetali grossolani (radici con diametro superiore a 2 cm) e i vertebrati edafici non vengono compresi nella sostanza organica del suolo.



Composizione (% in peso della sostanza secca) della frazione organica del suolo

I residui vegetali e animali

Germogli, foglie, ramoscelli, radici di alberi e arbusti, essenze erbacee, piante spontanee, residui colturali forniscono al suolo quantità elevate di sostanza organica (**input primario**).

Amminutati e in parte decomposti dall'attività della mesofauna, i residui vegetali diventano parte integrante del suolo per fenomeni di mescolamento e di incorporazione fisica.

Le specie animali vengono considerate fonte secondaria di sostanza organica (**input secondario**), anche se forniscono prodotti di elaborazione metabolica e, a conclusione del ciclo vitale, lasciano nel suolo la loro massa organica.

Alcune forme di vita animale, lombrichi, miriapodi, formiche, svolgono un ruolo importante nel mescolamento e nella traslocazione dei residui delle piante.

Risulta elevato, nella parte superficiale del suolo esplorato dalle radici, l'apporto di residui vegetali di piante coltivate, espresso come contenuto (tonnellate \cdot ha⁻¹) di carbonio organico.

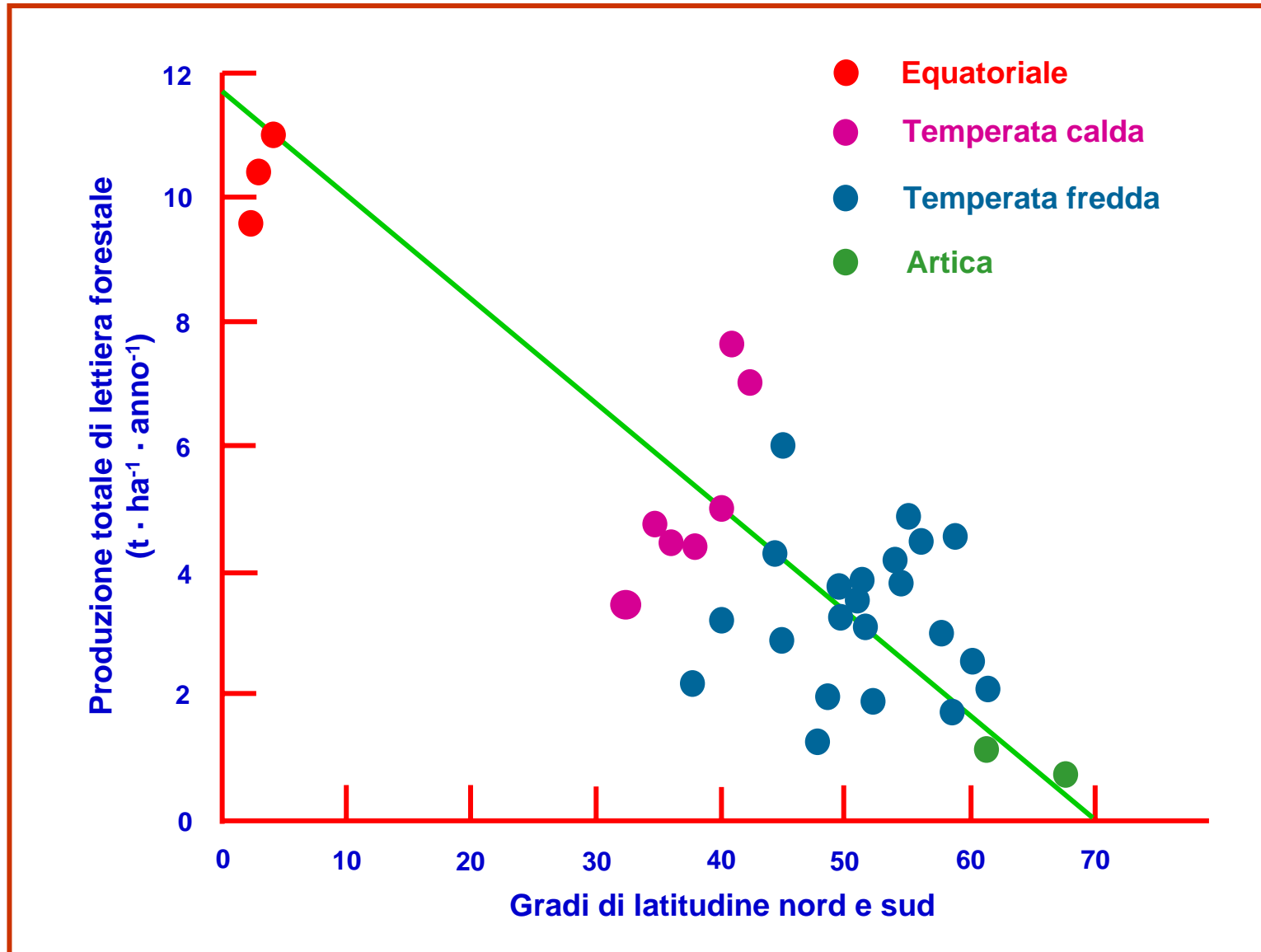
Con maggiore difficoltà può essere stimato l'input di residui derivati da essenze arboree. Infatti, anche se può essere calcolato con buona approssimazione il contributo degli organi epigei componenti la lettiera, non può essere definita con accuratezza la quantità annuale di sostanza organica derivata dalle radici che, anche se ben sviluppate, hanno dimensioni notevoli e non sono facilmente decomponibili.

E' stata accertata relazione lineare tra latitudine e produzione di lettiera forestale espressa in tonnellate \cdot ha⁻¹ \cdot anno⁻¹.

Coltura	Profondità di campionamento (cm)	Radici	Stoppie	Totale
Frumento (non concimato)	0 – 30	0,69	0,45	1,14
Frumento (+NPK)	0 – 30	0,88	0,59	1,47
Orzo (+NPK)	0 – 30	0,27	0,36	0,63
Avena (+NPK)	0 – 30	1,00	0,57	1,57
Patata (+NPK)	0 – 30	0,13 (**)		
Barbabietola (+NPK)	0 – 30	0,39 (**)		
Mais (+NPK)	0 – 80	1,04		
Soia	0 – 60	0,82		
(**) Esclusa la produzione raccolta				

Quantità di carbonio organico (tonnellate · ha⁻¹) (*) che può arrivare al suolo con le radici e le stoppie di alcune colture annuali

(*) Il contenuto di carbonio è stimato pari al 40% in peso delle radici secche



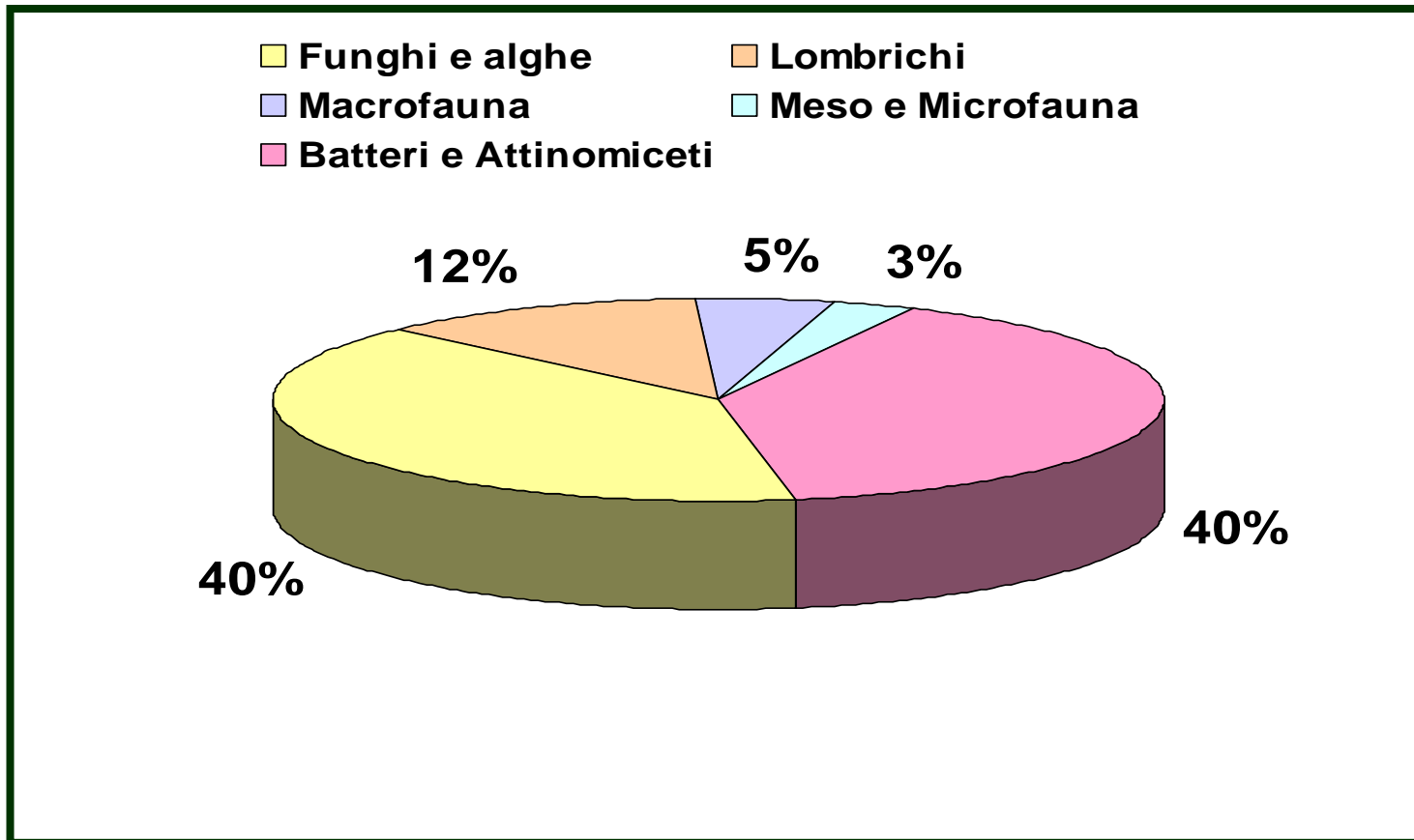
Rapporto tra latitudine e produzione di lettiera forestale (t · ha⁻¹ · anno⁻¹)

La biomassa

Se i residui vegetali costituiscono input primario di sostanza organica al suolo e fonte di energia per l'attività delle entità microbiche, le strutture cellulari di queste rappresentano input secondario.

E' stato accertato che, in condizioni ambientali ottimali, il 60% del carbonio presente nel substrato organico utilizzato dai microrganismi viene convertito in carbonio organicato nelle biostrutture cellulari. In teoria, pertanto, l'input secondario di carbonio non può superare, annualmente, il 60% dell'input primario. In pratica, risulta molto inferiore.

La quantità, la varietà ed il dinamismo delle entità biotiche del suolo risultano definite dalle condizioni ambientali, dalle caratteristiche pedologiche e dalle pratiche colturali.



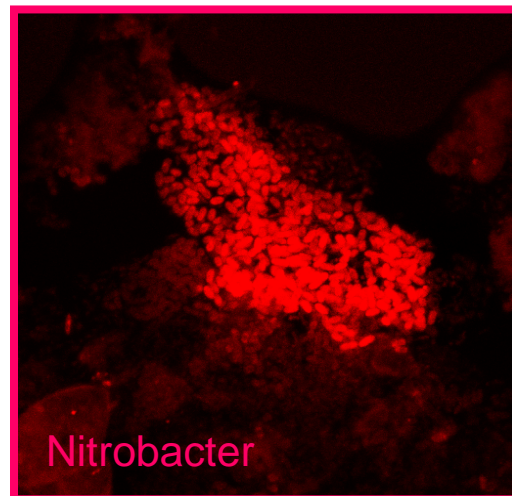
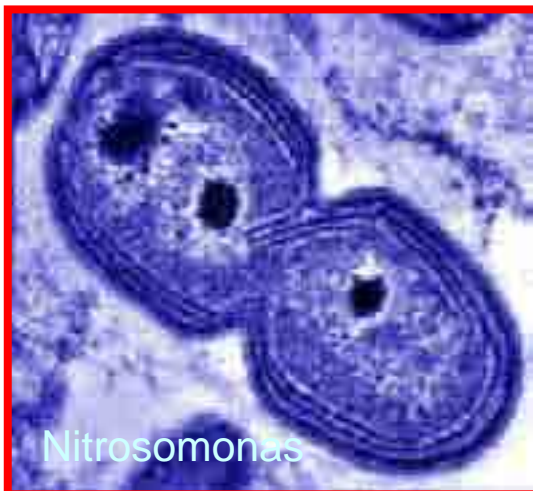
Composizione (% in peso della sostanza secca) della biomassa del suolo

La microflora

La biomassa del suolo è costituita per il 60-90% da microflora. I **batteri** sono organismi monocellulari che si accertano come cellule isolate, come catene e colonie, in particolare nella *rizosfera*. Presentano caratteristiche metaboliche estremamente variabili e sono capaci di utilizzare substrati di varia natura. I **batteri eterotrofi** necessitano, come fonte di energia e di carbonio, di complesse molecole organiche (glucidi, amido, pectine, emicellulose, cellulosa, proteine, peptidi, amminoacidi). I **batteri autotrofi** sintetizzano i costituenti cellulari da molecole inorganiche semplici impiegando l'energia luminosa (**batteri fotoautotrofi**) o quella derivata dall'ossidazione di S, NH_4^+ , NO_2^- , Fe^{2+} , Mn^{2+} (**batteri chemioautotrofi**). I batteri possono essere classificati come aerobi e anaerobi a seconda della capacità di utilizzare l'ossigeno come accettore finale di elettroni.

Importanti gruppi specializzati di batteri sono:

- i batteri nitrificanti autotrofi (*Nitrosomonas*, *Nitrobacter*) che ossidano lo ione ammonio $[\text{NH}_4^+]$ a ione nitrito $[\text{NO}_2^-]$ e ione nitrato $[\text{NO}_3^-]$
- i batteri azoto fissatori liberi (*Azotobacter*) o simbiotici (*Rhizobium*) che riducono l' N_2 molecolare atmosferico ad azoto organico
- i batteri denitrificanti che, in ambienti riducenti, sono capaci di utilizzare gli ioni NO_3^- e NO_2^- come fonte di ossigeno
- i solfo, ferro, manganese batteri che ossidano S^{2-} , Fe^{2+} , Mn^{2+} .



Gli *attinomiceti*, organismi unicellulari di dimensioni simili a quelle dei batteri, possono essere aerobi, eterotrofi, saprofitici e sono capaci di formare micelio ramificato.

I generi più diffusi (*Streptomyces*, *Nocardia*) riescono ad utilizzare substrati difficilmente decomponibili (lignine).

I funghi, entità eterotrofe, sono classificati in oltre un migliaio di specie appartenenti a circa duecento generi.

Sono comunemente presenti nel suolo i generi *Fusarium*, *Mucor*, *Aspergillus* e *Penicillium*.

Per l'attività metabolica molto efficiente, decompongono substrati particolarmente resistenti (cellulosa, emicellulose, lignina, sostanze pectiche).

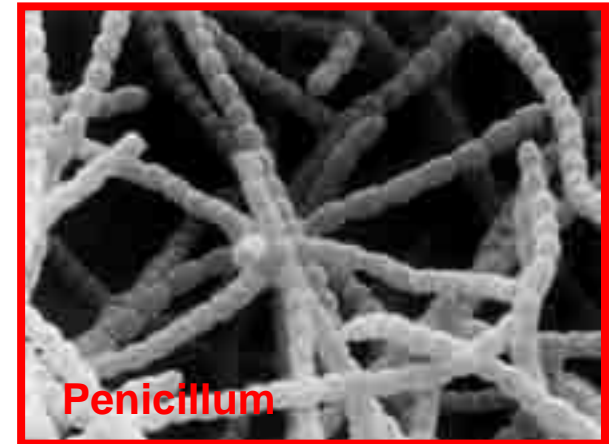
Rivestono importanza le **micorrize**, associazioni di funghi e radici di piante superiori, che favoriscono l'assorbimento di nutrienti, di fosforo in particolare.

Le **alghe** sono organismi autotrofi presenti, generalmente, negli strati superficiali del suolo per la necessità di utilizzare l'energia luminosa per il soddisfacimento delle proprie esigenze nutrizionali.

Sono note le *Cloroficee* (**alghe verdi**), le *Cianoficee* (**alghe verde-azzurre**) e le *Diatomee* (attive nel processo di immobilizzazione della silice).

I **virus**, organismi subcellulari, sono parassiti obbligati di cellule vegetali, animali e batteriche.

Anche se presenti occasionalmente nel suolo, possono restarvi per lungo periodo di tempo su residui vegetali infetti o adsorbiti sulle superfici di scambiatori organici ed inorganici.



La microfauna

I **protozoi** costituiscono le forme più semplici di vita animale. Sono numerose le specie presenti nel suolo, appartenenti alle classi dei **rizopodi**, dei **flegellati** e dei **ciliati**. Vivono in genere predando batteri, attinomiceti, alghe e nematodi, ma possono anche utilizzare saprofiticamente glucidi e proteine. In condizioni ambientali favorevoli possono moltiplicarsi in modo notevole inducendo difficoltà nutrizionali alle piante coltivate.



La mesofauna

E' costituita da organismi animali di dimensioni comprese tra 0.2 e 4 mm che hanno la funzione di frantumare i residui vegetali, di traslocare e rimescolare materiali organici ed inorganici, di formare canalicoli e piccole cavità con conseguente miglioramento della struttura del suolo.

I **nematodi** si accertano nel suolo in numero elevato. Sono conosciute specie predatrici, fitofaghe e saprofiti. Le infestazioni di nematodi costituiscono serio pericolo per le piante coltivate in serra.

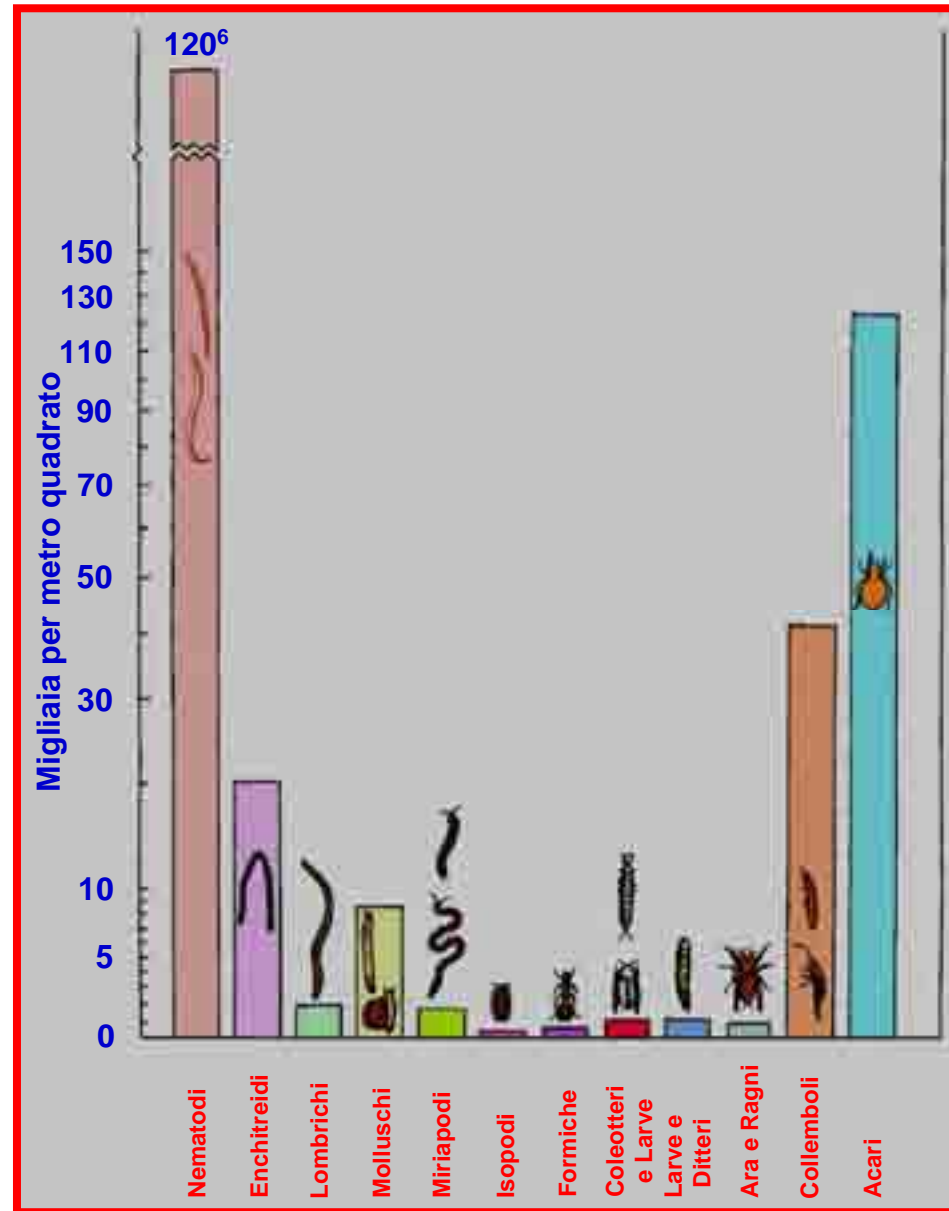
I **gasteropodi** (lumache e chioccioline), presenti in ambienti umidi, nella lettiera boschiva, nelle anfrattuosità del suolo, contribuiscono molto limitatamente al ricambio della sostanza organica.

E' rilevante, invece, il ruolo degli **oligocheti** nelle attività di rimescolamento e di omogeneizzazione delle frazioni minerali e organiche.

Le specie di **lombrichi** più diffuse (*Lombricus terrestris*, *Allolobophora caliginosa*) sono capaci di ingerire annualmente fino a 900 quintali di suolo per ettaro. Nel passaggio attraverso l'intestino di questi organismi, il materiale organico subisce parziale decomposizione enzimatica, i costituenti minerali vengono disgregati.

Le deiezioni dei lombrichi (*coproliti*) stimolano lo sviluppo delle piante per attività ormonale e contribuiscono ad aumentare la fertilità del suolo.

Acari, **collemboli**, **insetti** (*coleotteri*, *larve*, *formiche*, *termiti*) appartengono al gruppo degli **artropodi** e svolgono ruolo importante nella frantumazione dei residui vegetali e nella disseminazione dei microrganismi.



Comparazione in scala logaritmica del numero di organismi animali presenti in un metro quadrato di suolo (modificata da Kevan, 1965)



Composizione chimica dei residui vegetali ed animali

La composizione elementare delle piante e di altre entità biotiche è caratterizzata da costanza del contenuto di carbonio e da notevole variabilità della percentuale di azoto. I valori più elevati di questo elemento si accertano nei batteri, la cui composizione cellulare è definita da notevole quantità di proteine ed acidi nucleici, i più bassi nei tessuti legnosi. Il contenuto di fosforo è strettamente correlato con quello dell'azoto.

Nelle Brassicacee sono state riscontrate le percentuali più elevate di zolfo.

La quantità di potassio varia dallo 0.03 al 2.5% raggiungendo il valore massimo (5%) nel letame.

Specie	C (%)	N (%)	P (%)	S (%)	K (%)
Mais (<i>Zea mais</i>)	44	1,4	0,2	0,17	0,9
Cavolo (<i>Brassica oleracea</i>)	42	4,3	0,45	1,6	2,5
Avena (<i>Avena sativa</i>)	-	1,9	0,22	0,12	2,4
Erba medica (<i>Medicago sativa</i>)	45	3,3	0,28	0,44	0,9
Legno di pino (<i>Pina excelsa</i>)	-	0,13	0,006	0,005	0,03
Batteri (<i>Escherichia coli</i>)	50	15	3,2	1,1	-
Attinomiceti (<i>Streptomyces cerevisiae</i>)	50	11	1,5	0,4	1,8
Lieviti (<i>Saccharomyces cerevisiae</i>)	47	6,2	0,7	0,3	2,0
Funghi (<i>Penicillium chrysogenum</i>)	44	3,4	0,6	0,4	0,6
Lombrichi (<i>Lumbricus terrestris</i>)	46	10	0,9	0,8	1,1
Letame bovino	37	2,8	0,54	0,7	5,1

Composizione chimica elementare (% della sostanza secca)
di alcune piante, di altre entità biotiche e del letame

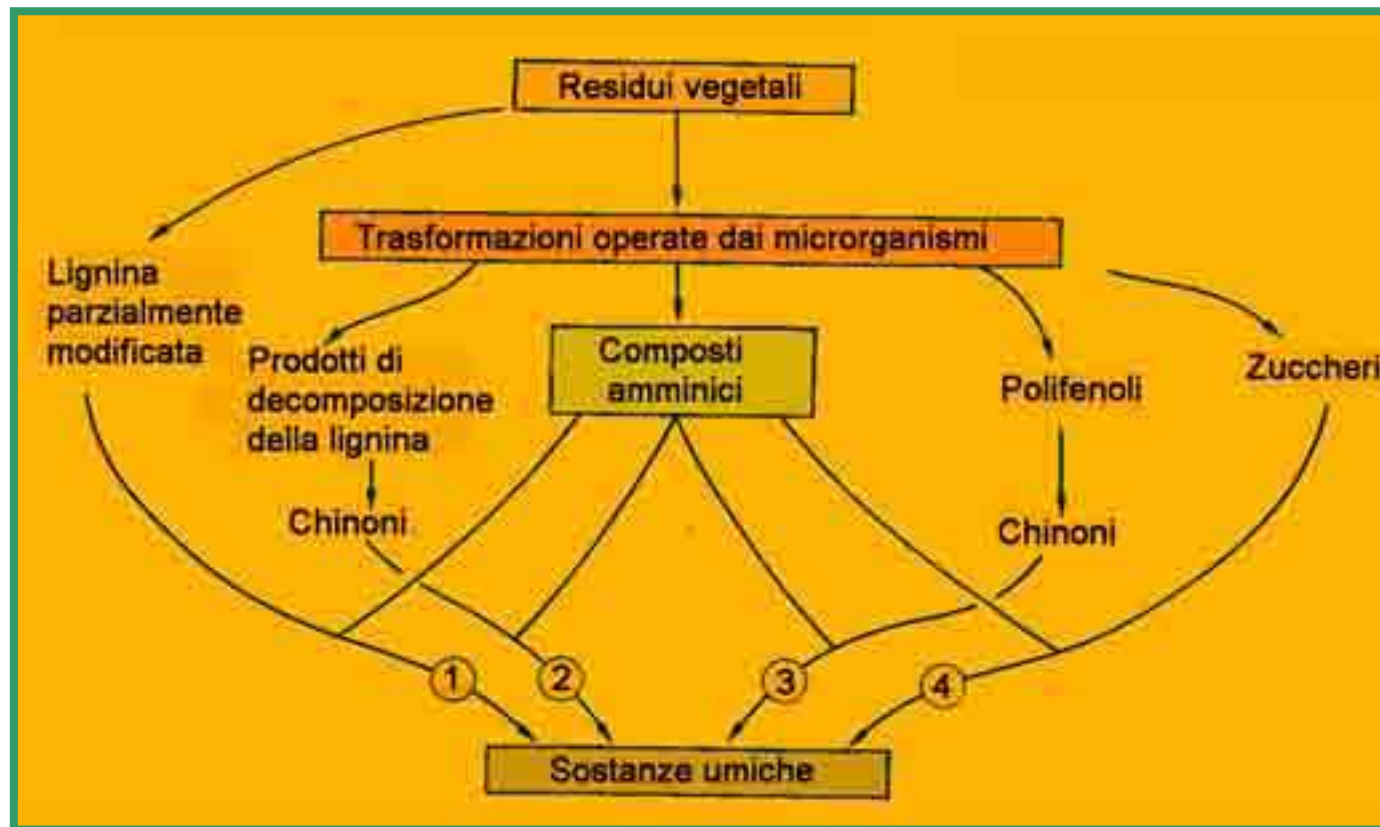
I valori accertati per il contenuto di alcuni dei principali composti chimici presenti nei tessuti vegetali sono indicativi dell'estrema variabilità di composizione dell'input primario di sostanza organica al suolo.

COSTITUENTI	Stocchi di mais	Paglia di segale	Foglie di quercia	Piante di trifoglio	Aghi di pino freschi	Aghi di pino secchi	Legno di cipresso
Frazioni solubili in alcool e etere	6	5	6	10	8	24	5
Frazioni solubili in acqua fredda e calda	14	6	14	17	13	7	3
Emicellulose	18	21	13	9	14	19	11
Cellulosa	30	39	14	27	18	16	38
Lignine	11	15	30	11	27	23	28
Proteine	2,0	0,8	4,3	8,1	8,5	2,2	0,7
Ceneri	8	5	5	10	3	3	1

Contenuto (% della sostanza secca) di alcuni dei principali costituenti di parti di piante diverse (modificata da Waksman, 1936)

Biochimica del processo di umificazione

Molte teorie sono state formulate per chiarire i processi biochimici di formazione delle sostanze umiche.



**Schematizzazione di alcuni meccanismi di formazione delle sostanze umiche
(modificata da Stevenson, 1982)**

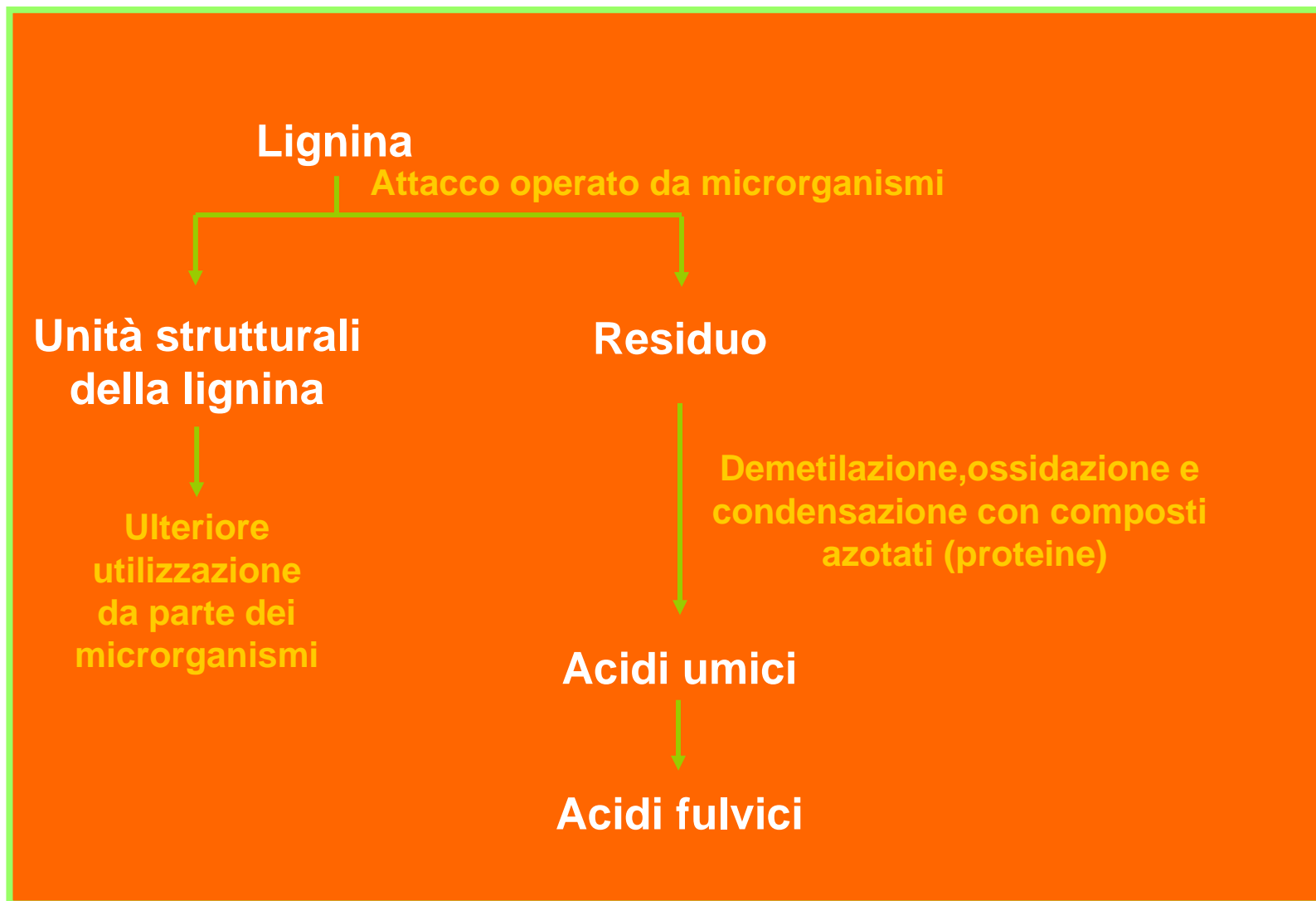
Per molti anni si è ritenuto che le sostanze umiche derivassero dalla lignina.

Secondo questa teoria, sostenuta da Waksman (1936), la lignina, non completamente utilizzata dai microrganismi, costituirebbe la parte fondamentale dei composti umici presenti nel suolo.

La macromolecola ligninica, parzialmente trasformata, reagirebbe con le proteine, derivate da sintesi microbica, con formazione di una **base di Schiff**:



Prodotti iniziali di successive reazioni di polimerizzazione sarebbero gli acidi umici che, per successiva ossidazione e frammentazione darebbero origine agli acidi fulvici.

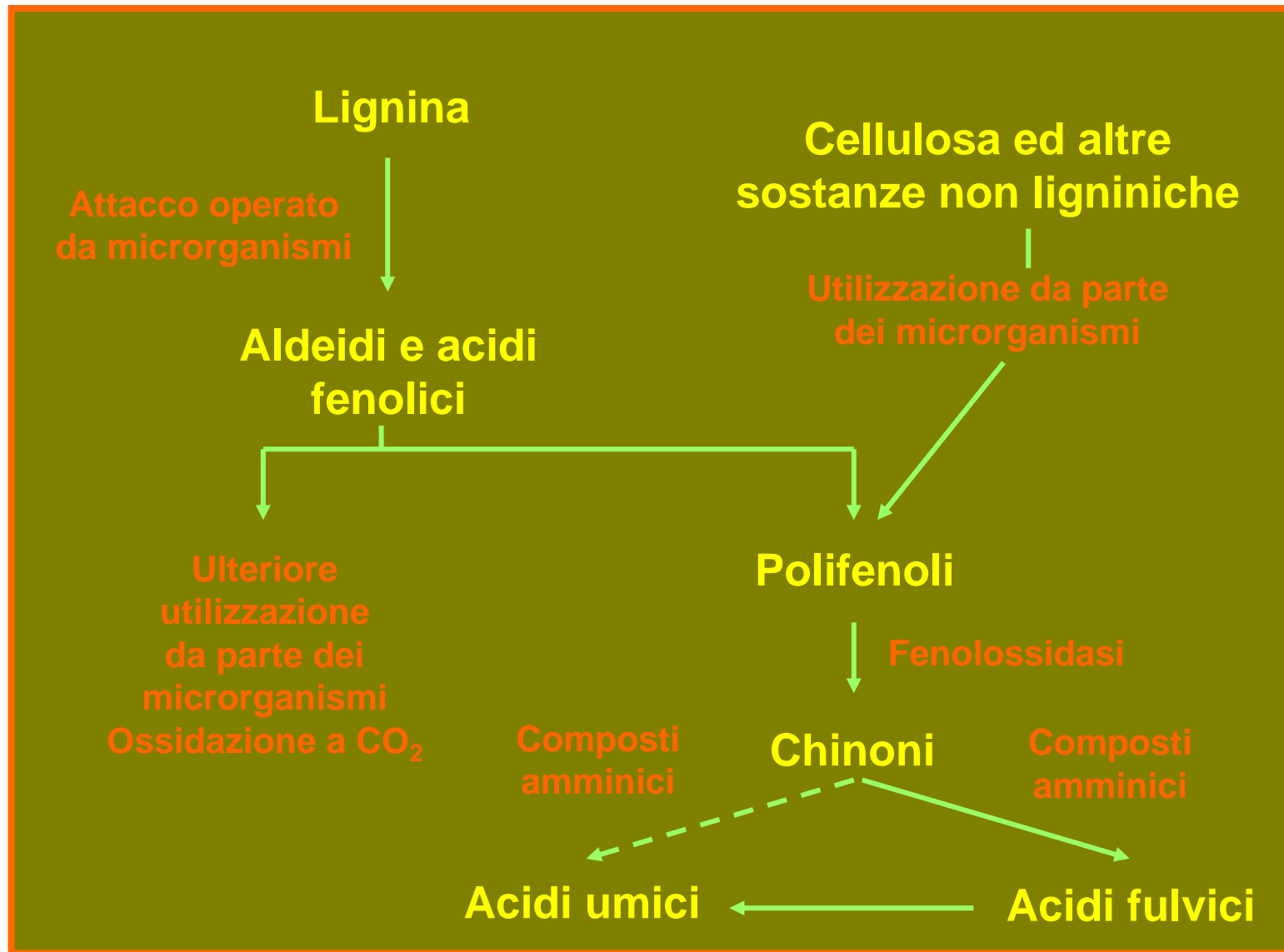


Schematizzazione del processo di formazione dell'humus secondo la teoria di Waksman (schema 1) (modificata da Stevenson, 1982)

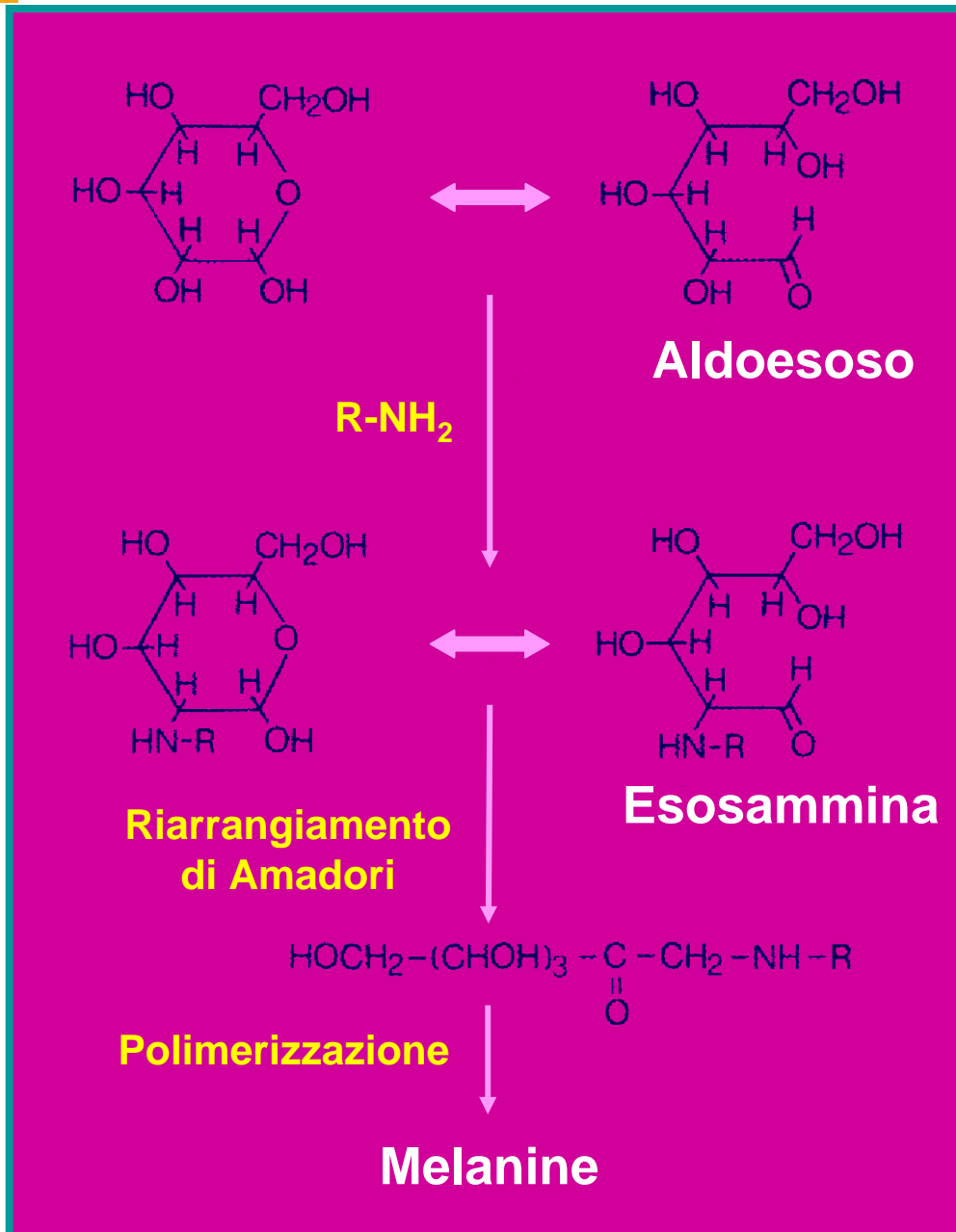
Anche più moderne vedute assegnano alla lignina ruolo importante nella sintesi dell'humus. Le aldeidi e gli acidi fenolici, derivati dalla lignina per attacco di entità biotiche (funghi in particolare), verrebbero trasformati, enzimaticamente, in chinoni. Questi, successivamente, per polimerizzazione in presenza o in assenza di composti amminici, formerebbero molecole humo-simili.

Secondo altra teoria, i polifenoli sarebbero, invece, sintetizzati da microrganismi con utilizzazione di carbonio derivato da substrati non ligninici (cellulosa). I polifenoli, ossidati a chinoni, sarebbero trasformati, per processi di condensazione e polimerizzazione, in macromolecole umiche.

Nella neogenesi del materiale umico, in ambienti lacustri o negli orizzonti più profondi del suolo, avrebbe importanza la formazione di composti azotati di colore scuro derivati da polimerizzazione di zuccheri riduttori e amminoacidi originatisi come metaboliti microbici.



Schematizzazione del processo di formazione dell'humus secondo la teoria dei polifenoli (schemi 2 e 3) (modificata da Stevenson, 1982)



Schematizzazione del processo di formazione dell'humus per polimerizzazione di zuccheri riduttori ed aminoacidi originatisi come metaboliti microbici (reazione di Mailard) (schema 4)

I risultati di indagini recenti portano a ritenere che la formazione dell'humus possa essere di origine poligenetica, essere definita, cioè, da una sequenza di reazioni singolarmente considerate nelle precedenti teorie.

Evidenza sperimentale consente di ritenere che:

- ✓ **durante la decomposizione dei residui vegetali, la lignina venga liberata dai suoi legami con la cellulosa**
- ✓ **per degradazione ossidativa, la molecola ligninica dia origine ad unità strutturali primarie**
- ✓ **queste unità subiscano processo di ossidazione e demetilazione mentre i polifenoli risultanti vengano ossidati a chinoni per attività della polifenolossidasi**
- ✓ **nel corso del processo ossidativo i chinoni reagiscano con composti azotati (amminoacidi) con formazione di polimeri molto scuri.**

- ✓ simili reazioni abbiano luogo anche tra composti endocellulari trasformati a radicali liberi per autolisi enzimatica all'interno dell'organizzazione strutturale dei residui vegetali e delle cellule microbiche prima della rottura delle pareti cellulari.
- ✓ i gruppi amminici, peptidi, ammino zuccheri (acido muramico, β -D-glucosammina, β -D-galattosammina) e polisaccaridi contenenti unità di ammino zuccheri reagiscano con i chinoni per addizione nucleofila, seguita da deamminazione e polimerizzazione.
- ✓ le unità fenoliche possano essere biosintetizzate da funghi o da altri microrganismi con l'utilizzazione di substrati non aromatici attraverso la via metabolica dell'acetato- malonato o dell'acido scichimico.

Il rapporto carbonio/azoto

Fornisce utile indicazione della tendenza alla mineralizzazione dei residui vegetali e delle macromolecole umiche operata dalle comunità edafiche.

Per la costanza del contenuto di carbonio nei tessuti vegetali e animali, il valore del rapporto C/N risulta inversamente proporzionale alla percentuale di azoto.

Tenuto conto che l'attività microbica viene esaltata dalla disponibilità di azoto, saranno maggiormente suscettibili di completa decomposizione i materiali organici per i quali minore è il valore di C/N.

I residui con valore del rapporto C/N inferiore a 20 possono soddisfare le esigenze delle entità biotiche e, per la rapida mineralizzazione e conseguente liberazione di nutrienti, contribuire alla nutrizione delle piante.

I materiali organici con valore del rapporto C/N maggiore di 30,

non fornendo adeguate quantità di azoto, costringono i microrganismi ad utilizzare per la produzione di biomassa tutte le forme azotate $[\text{NH}_4^+, \text{NO}_3^-]$ disponibili nel suolo, inducendo temporanee difficoltà nutrizionali per le piante.

Le sostanze umiche, invece, anche presentando quantità assolute di carbonio e azoto variabili, hanno, nei diversi ambienti climatici, valori del rapporto C/N praticamente costanti.

Nei suoli incolti e coltivati delle zone climatiche umide, realizzandosi nel tempo condizioni di equilibrio, per lenta mineralizzazione delle macromolecole umiche che bilancia le perdite di carbonio e azoto, il rapporto C/N si stabilizza intorno a valori compresi tra 10 e 12.

Materiale organico	Carbonio %	Azoto %	Rapporto C/N
Erba medica	39.0	3.0	13
Trifoglio	40.0	2.5	16
Fieno di leguminosa	40.0	1.6	25
Paglia di avena	40.0	0.5	80
Stocchi di mais	44.0	1.4	31
Letame bovino	37.0	2.8	13

**Contenuto percentuale di carbonio, azoto e valore del rapporto C/N
di materiali organici diversi**

Materiale organico	Rapporto C/N	Degradabilità	Permanenza nel suolo (anni)
Sostanze umiche	8-13	Molto lenta	<5-10³
Letame	15-30	Elevata	<5
Fieno, erba, strame	20-70	Elevata	<5
Lettiera di latifoglie	20-60	Elevata	<5
Lettiera di conifere	30-40	Moderata	1-10
Paglia	60-120	Moderata	<1-10
Aghi di pino	80-130	Moderata	<1-10
Corteccia di alberi	100-1500	Lenta	10-102
Legno	200-1500	Lenta	10-102

Valore del rapporto C/N, degradabilità e tempo di permanenza nel suolo di materiali organici diversi (modificata da Nieder et al., 2003)