

**ISTITUTO SUPERIORE DI SANITA'**

**Indicatori di qualità  
dello stato di salubrità del suolo**

**Silvana Fiorillo (a), Laura Volterra (b)**

*(a) Depuratore di Cuma, Licola di Pozzuoli, Napoli*  
*(b) Laboratorio di Igiene Ambientale, Istituto Superiore di Sanità, Roma*

Istituto Superiore di Sanità, Roma  
Indicatori di qualità dello stato di salubrità del suolo.  
Silvana Fiorillo, Laura Volterra  
Giu 93, 39 p. Rapporti ISTISAN 93/17 (in italiano)

Il suolo viene raggiunto accidentalmente o sistematicamente da inquinanti di varia natura, a volte altamente tossici, che nel suo interno subiscono una serie di processi chimico-fisici e biologici determinanti per il loro destino. Lo studio degli effetti dell'inquinamento del suolo ha permesso di identificare efficaci bioindicatori utilizzabili direttamente nella zona ambientale in esame oppure nella sperimentazione di laboratorio. Accanto ai classici parametri dell'attività biologica, vengono analizzate le modificazioni delle popolazioni algali e cianobatteriche e alcune funzioni rizosferiche. Viene, inoltre, ricordata l'importanza che rivestono nel campo del monitoraggio ambientale le comunità di microartropodi e gli organismi vegetali.

*Parole chiave:* Analisi e controlli, Suolo.

Istituto Superiore di Sanità, Rome (Italy)  
Quality indicators of soil health state.  
Silvana Fiorillo, Laura Volterra  
Jun 93, 39 p. Rapporti ISTISAN 93/17 (in Italian)

Soil is by chance or systematically reached by various pollutants, sometimes highly toxic, which inside it, undergo a series of chemical, physical and biological processes, which are determinant for their future. The study of the effects of soil pollution let us identify some efficacious bioindicators, which can be utilized directly on the considered environment zone or on laboratory experimentations. Together with the usual parameters of the biological activity, the modifications of the algal and cyanobacterial populations and some rhizospheric functions were analyzed. Moreover, the importance in the field of the environment monitoring of the microarthropod community and of the vegetable organisms is underlined.

*Key words:* Analyses and controls, Soil.

Si ringrazia il Sig. Bruno Bartolotta, Funzionario della Regione Campania, Servizio Ricerca Scientifica per la collaborazione fornita.

## INDICE

- <b>Introduzione</b>	1
- <b>1. Il suolo</b>	1
1.1 Caratteristiche fisiche del suolo	3
1.2 Caratteristiche chimiche del suolo	4
1.3 Caratteristiche microbiologiche del suolo	5
- <b>2. Attività biogeochimica dei microrganismi del suolo</b>	8
2.1 Il ciclo dell'azoto	8
2.2 Il ciclo del carbonio	13
2.3 Il ciclo dello zolfo	14
- <b>3. Possibilità di inquinamento del suolo</b>	16
- <b>4. Migrazione inquinanti</b>	17
4.1 Meccanismi fisici	17
4.2 Meccanismi chimici	18
4.3 Meccanismi microbiologici	19
- <b>5. Inquinamento da smaltimento dei rifiuti solidi nel suolo</b>	19
5.1 Il compostaggio	20
5.2 La discarica	20
5.2.1 Il percolato	20
- <b>6. Inquinamento da effluenti</b>	21
6.1 Effluenti da allevamenti zootecnici	21
6.2 Effluenti da impianti di depurazione dei reflui urbani	23
6.2.1 Smaltimento dei reflui dalla linea acqua	24
6.2.2 Smaltimento dei reflui dalla linea fanghi	25

<b>- 7. Inquinamento del terreno da prodotti chimici per l'agricoltura</b>	<b>26</b>
7.1 Parametri chimici e microbiologici influenzati dagli erbicidi	29
7.2 Nuovi metodi di monitoraggio microbiologico dell'inquinamento del suolo da erbicidi	
<b>- 8. Lo studio delle taxocenosi di artropodi nella valutazione naturalistica del territorio</b>	<b>31</b>
8.1 Influenza degli erbicidi sulla pedofauna	32
<b>- 9. Le specie vegetali come indicatori ambientali</b>	<b>34</b>
<b>- Conclusioni</b>	<b>36</b>
<b>- Bibliografia</b>	<b>38</b>

## INTRODUZIONE

Nel processo di trasformazione ambientale, conseguente anche a fenomeni di inquinamento, si è dato in passato particolare risalto a matrici come l'acqua, riconoscendone il valore essenziale per il mantenimento della vita. Nel settore "aria" sono di interesse preminente i contaminanti chimici. Il suolo, pur se ampiamente sfruttato per scopi produttivi, ma anche per smaltire reflui da allontanare dai centri abitati, è stato poco considerato. La pedologia ha indirizzato la sua attenzione ai processi chimici, fisici e biologici che potevano avere ricaduta sulle rese agricole.

Si è trascurato che il suolo è la strada percorsa dall'acqua per ricaricare corpi idrici superficiali e profondi. Una sua alterazione avrebbe quindi risonanza su quell'elemento essenziale per ogni forma biologica.

Nel suolo vivono molti organismi batterici, microalgali e animali, la cui mutazione di distribuzione quali-quantitativa determinerebbe cambiamenti nei cicli depurativi e biodegradativi che, nel terreno, hanno massima espressione.

Questo rapporto intende iniziare l'approfondimento della conoscenza di questa matrice, fornendo informazioni di base sui processi importanti che si svolgono nel suolo, conservandone la produttività. Intende anche indicare come indirizzare la ricerca nel tentativo di giungere a valutazioni sintetiche e sinergiche del grado di salubrità del terreno.

### 1. Il suolo

Il suolo viene definito come un materiale sciolto superficiale del globo terrestre nel quale crescono le piante e che normalmente consiste di rocce disintegrate mescolate a sostanza organica e sali solubili (Webster, 1971) (1).

Si tratta di un sistema polidisperso eterogeneo composto da solidi, liquidi e gas in varie proporzioni. Tra le particelle solide di varia grandezza si formano spazi vuoti, i pori, che possono contenere acqua o aria.

Il suolo è mediamente composto per il 49% da ossigeno, per il 32% da silicio, per il 7% da alluminio, per il 4% da ferro, per il 2% da carbonio e per il rimanente da potassio, magnesio, azoto, sodio, titanio ed altri elementi. Per la frazione solida sono predominanti i componenti allumino-silicati oltre ad ossidi e fosfati. Il contenuto di sostanza organica è limitato in percentuale e deriva dalla degradazione biologica di materiale di rifiuto sia animale che vegetale con formazione di polimeri quali i polisaccaridi, proteine, lignina, mercaptani, derivati dell'acido nucleico. L'acqua, presente in forme diverse, caratterizza i processi fisico-chimici che avvengono nel suolo. Si possono distinguere cinque forme (Fig. 1) :

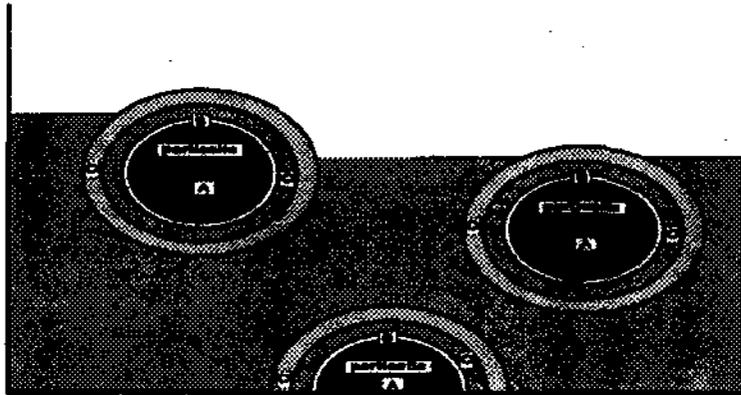


Fig. 1 - Presenza dell'acqua nel suolo

**Forma A** - l'acqua inamovibile che è in combinazione chimica con gli elementi della particella;

**Forma B** - l'acqua anch'essa inamovibile che aderisce alla particella in un velo superficiale a causa di forze elettriche di attrazione;

**Forma C** - l'acqua che, pur essendo nella condizione descritta in B, può essere rimossa con riscaldamento a circa 100°C.

**Forma D** - l'acqua capillare che è trattenuta alla particella per tensione superficiale; questa è facilmente rimovibile per essiccamento all'aria.

**Forma E** - l'acqua che scorre per gravità tra le particelle.

La prima zona del sottosuolo che l'acqua meteorica incontra e nella quale scorre più o meno rapidamente viene denominata **zona non satura**, in quanto questa zona viene riempita

durante gli eventi piovosi con movimento del fluido verso il basso e si svuota per evaporazione nei periodi secchi con movimento verso l'alto dell'acqua sotto forma di vapore. La velocità di scorrimento dipende dal numero e dalla grandezza dei pori e dei canalicoli. Se l'acqua, nel suo movimento verticale, oltre che essere fermata da una barriera ne trova un'altra orizzontale, si insinua tra esse e comincia a scorrere come se si trovasse in una condotta idrica. In questo caso tutti i pori saranno evidentemente pieni. La parte aereiforme si trova nei primi strati del suolo. L'aria riempie i pori del terreno nella cosiddetta zona non satura.

### 1.1 - Caratteristiche fisiche del suolo

Le proprietà fisico-meccaniche di un suolo sono legate alle dimensioni delle particelle che lo compongono. Si definisce composizione granulometrica o tessitura il rapporto esistente tra le varie frazioni che compongono il suolo. Le particelle variano per diametro: quelle più piccole (diametro minore di 0,002 mm) costituiscono le argille, a cui seguono il limo e la sabbia (fig.2).

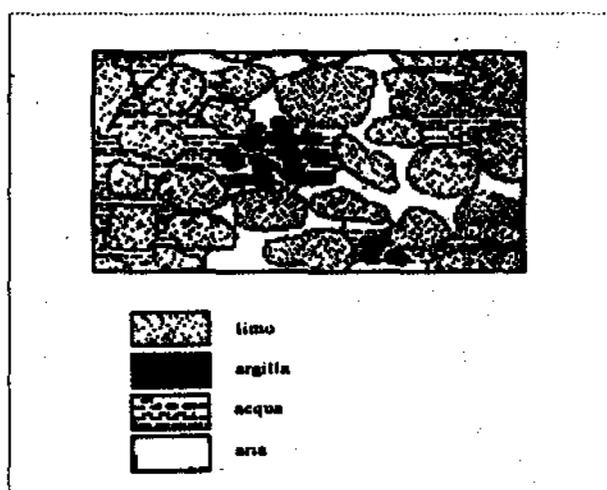


Fig. 2 - Rappresentazione schematica ingrandita di un suolo

Le particelle che costituiscono la sabbia hanno diametro massimo di 2 mm.

Oltre questa misura si ha lo scheletro del terreno con materiali che vanno dalla ghiaia ai ciottoli.

Le rocce che interessano principalmente i fenomeni di alterazione del suolo a seguito di immissione di sostanze inquinanti, sono quelle sedimentarie cioè i materiali che si sono depositati nei secoli dopo disgregazione delle rocce originali e che hanno subito modifiche perchè sottoposti a pressioni da parte di altri depositi o per l'intervento di altri fenomeni.

Le rocce sedimentarie piu' importanti per i processi di migrazione sono le arenarie e le argille, mentre i conglomerati costituiscono rocce compatte difficilmente attraversabili da fluidi. Il limo è un materiale che si trova per granulometria tra le sabbie e le argille e che viene denominato anche argilla limosa. La differenza tra sabbia e argilla non è data solo dalla dimensione delle particelle, ma anche dal contenuto di minerali: quarzo, feldspati, alcalini, miche e composti quali idrossido di ferro e di alluminio e carbonati.

## 1.2 - Caratteristiche chimiche del suolo

Le particelle del suolo possono essere coinvolte in trasformazioni chimiche al passaggio di liquidi attraverso di esse. L'argilla, offrendo una superficie specifica maggiore della sabbia, ed essendo dotata di cariche superficiali negative, si presta più efficacemente alla ritenzione dei metalli pesanti. Un'altra caratteristica importante, specie per la migrazione di metalli pesanti, è il pH. Nei suoli normalmente il pH varia da 4 a 9. Altra caratteristica chimica del suolo è il contenuto di idrossidi di alluminio, ferro e manganese e di sostanza organica.

Gli idrossidi intervengono a minimizzare la migrazione di alcuni metalli, mentre la sostanza organica contribuisce ai processi di complessazione.

La sostanza organica del suolo può essere considerata composta da: materiale fresco, costituito da residui di piante ed animali non completamente decomposti che va classificato come sostanza non umica; materiale rappresentato da prodotti più o meno decomposti o risintetizzati, derivanti dal primo gruppo, la cosiddetta sostanza umica.

Le sostanze non umiche (proteine, carboidrati, acidi organici, zuccheri, grassi, cere, resine, lignina, pigmenti e composti a basso peso molecolare), una frazione bassa della sostanza organica del suolo, vanno continuamente e lentamente evolvendosi verso le sostanze

umiche. Queste ultime presentano una colorazione scura, caratteristiche acide, peso molecolare relativamente alto e proprietà chimico-fisiche non ancora perfettamente note. Vengono generalmente suddivise in tre frazioni che si distinguono per la diversa solubilità:

- 1) acidi fulvici - solubili sia in acidi che in alcali;
- 2) acidi umici - solubili in alcali ma non in acidi e costituiscono la frazione più abbondante dell'humus;
- 3) umina - insolubile sia in acidi che in alcali.

I composti umici, polimeri di composti aromatici contenenti catene laterali alifatiche, si differenziano per grado di polimerizzazione e peso molecolare.

### **1.3 - Caratteristiche biologiche del suolo**

Le condizioni che influenzano la presenza di forme vitali nel suolo possono essere così riassunte :

- a) quantità e tipo di sostanze nutritive.
- b) umidità disponibile.
- c) grado di aereazione.
- d) temperatura.
- e) pH.
- f) presenza di apparati radicali.
- g) inquinamento.
- h) competizione biologica.

#### **Batteri**

L'attività microbica (2) viene svolta prevalentemente nella parte superficiale del suolo, in media in uno strato che va dai 30 ai 50 cm., perché al di sotto il suolo non offre sufficienti risorse energetiche e le condizioni ambientali di temperatura e di contenuto di ossigeno sono sempre più deficitarie a mano a mano che si scende in basso. Anche in questa parte del

suolo esiste, tuttavia, una popolazione meno densa di microrganismi oligotrofi che si mantengono in stato di "*starvation*", ma che sono pronti ad attivarsi metabolicamente in condizioni particolari, quali la contaminazione chimica del terreno. A queste forme procariotiche fanno riferimento le biotecnologie che si occupano delle strategie di recupero in caso di inquinamento di suoli e di acquiferi.

Nei primi centimetri del suolo "produttivo" si trovano batteri autotrofi ed eterotrofi, mesofili, termofili e psicrofili; aereobi e anaerobi; cellulolitici; solfoossidanti; azotofissatori; proteolitici ed altri. Un gran numero di actinomiceti, dell'ordine dei milioni al grammo, è presente nei suoli asciutti e caldi; i generi predominanti di questo gruppo sono *Nocardia*, *Streptomyces* e *Micromonospora*. Questi microrganismi, a cui è dovuto l'odore di muffa o di terra di un campo arato di fresco, sono capaci di degradare molte sostanze chimiche complesse di conseguenza hanno un ruolo importante nel suolo.

La regione in cui suolo e radici sono a contatto viene chiamata rizosfera. La popolazione microbica nella rizosfera è notevolmente superiore a quella del suolo privo di radici. Il loro accrescimento è promosso e diretto selettivamente dalle sostanze nutritive liberate dall'apparato radicale delle piante. Parallelamente l'accrescimento della pianta è influenzato dai prodotti del metabolismo microbico che vengono rilasciati nel suolo.

### Funghi

Il suolo è abitato da centinaia di differenti specie di funghi i quali sono più abbondanti in prossimità della superficie, dove è probabile che prevalga una condizione aerobica. Essi sono presenti sia nello stato micetico sia in quello sporale. Per questo è difficile stimare il loro numero. I titoli riferiti variano dalle migliaia alle centinaia di migliaia per ogni grammo di suolo.

I funghi decompongono attivamente i principali costituenti dei tessuti vegetali cioè cellulosa, lignina e pectina, e il micelio delle muffe accumulandosi all'interno del suolo, ne migliora la struttura fisica.

I lieviti non sono molto abbondanti nel suolo tranne che in certi luoghi, per esempio, nei vigneti dove la presenza di zuccheri favorisce il loro accrescimento.

### Alghe

La popolazione delle alghe nel suolo è numericamente inferiore a quella di batteri e di funghi. Predominano le alghe verdi, le diatomee e i cianobatteri. La capacità fotosintetica incide sulla loro predominanza in superficie o immediatamente sotto lo strato superficiale del suolo. In alcune situazioni le alghe attuano trasformazioni importanti e benefiche; per esempio, sui terreni nudi ed erosi possono iniziare l'accumulo di sostanza organica grazie alla loro capacità sia di fissare l'azoto sia di svolgere la fotosintesi.

### Protozoi

La maggior parte dei protozoi del suolo è costituita da *flagellati o amebe*. Essi sono importanti nell'equilibrio biocenotico del suolo perchè la loro modalità di nutrizione predominante implica l'ingestione di batteri.

### Virus

Nel suolo sono presenti sia virus batterici sia alcuni virus dei vegetali e degli animali. Queste forme biologiche possono essere distribuite in più orizzonti del suolo grazie alle loro dimensioni e alle cariche elettriche dei capsidi. Sperimentalmente si è dimostrato che possono percorrere distanze di 300 m. in profondità e 30 m. orizzontalmente.

## 2. Attività biogeochimica dei microrganismi del suolo

Il più importante ruolo dei microrganismi del suolo è la loro funzione come agenti biogeochimici per la mineralizzazione di carbonio, azoto, zolfo, fosforo (2).

### 2.1 Il ciclo dell'azoto

La sequenza di trasformazioni che conducono dall'azoto atmosferico libero all'azoto inorganico fissato, a semplici composti organici, a composti organici complessi nei tessuti delle piante e degli animali e nei microrganismi, e alla liberazione finale di questo azoto che viene riconvertito in azoto atmosferico, costituisce il ciclo dell'azoto (Fig.3).



Fig. 3 - Il ciclo dell'azoto

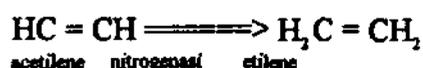
#### Fissazione dell'azoto atmosferico

Alcuni microrganismi sono capaci di utilizzare l'azoto molecolare presente nell'atmosfera come loro sorgente di azoto. La conversione dell'azoto molecolare in composti azotati viene

chiamata fissazione dell'azoto. In questo processo intervengono due gruppi di microrganismi:

- 1) microrganismi non simbiotici che vivono liberamente ed indipendentemente nel suolo (tra cui sono compresi i cianobatteri detti anche alghe blu per la loro capacità fotosintetica)
- 2) microrganismi simbiotici, che vivono nelle radici delle leguminose.

La capacità dell'enzima azotofissatore di agire sull'acetilene, scoperta verso la metà degli anni 60, ha condotto allo sviluppo di un metodo semplice, rapido e relativamente economico, che oggi è ampiamente usato per misurare la fissazione dell'azoto. La prova si basa sulla osservazione che l'enzima azoto- fissatore (nitrogenasi) interagisce con composti contenenti un triplo legame, per esempio con l'acetilene per formare etilene come segue:



In questo metodo, il campione da saggiare per la determinazione dell'attività nitrogenasica viene esposto all'acetilene e la fase gassosa viene analizzata per la determinazione dell'etilene mediante la cromatografia gas-liquido. La quantità di etilene prodotta è la misura dell'attività nitrogenasica.

#### Fissazione non simbiotica dell'azoto atmosferico

È stata studiata ampiamente con Clostridium pasteurianum e con specie di Azotobacter. Il primo è un bacillo anaerobio e i secondi sono cellule aerobie, e sia l'una sia gli altri sono ampiamente distribuiti nel suolo. In anni recenti è stato scoperto che molti altri microrganismi fissano l'azoto. (Tab.1)

#### Fissazione simbiotica dell'azoto atmosferico

È compiuta da rizobi (batteri del genere Rhizobium) in associazione con le leguminose. Prima di poter fissare l'azoto questi batteri debbono stabilirsi nelle cellule del tessuto

radicale della pianta ospite lungo un "filo di infezione". Così alcune cellule della pianta si infettano, si tumefanno e aumentano il proprio tasso di divisione, con la conseguente formazione di tubercoli o noduli radicali sul sistema radicale (Fig.4).

L'azoto fissato è utilizzato dalle piante e convertito in proteine vegetali.

Tab. 1 - Microrganismi liberi capaci di azotofissazione biologica

<p><b>BATTERI AEROBI OBBLIGATI</b>  <b>FAMIGLIA AZOBACTERACEAE</b>            - Azobacter, Azomonas, Azotococcus, Beijerinckia, Derxia            - Mycobacterium flavum 301, M.rossoalbum, M.azotab.            - Methyloalum trichosporum            - Thiobacillus ferrooxidans</p> <p><b>MICRORGANISMI FOTOTROFI AEROBI</b>  <b>(ALGHE AZZURRE)</b>  <b>FAMIGLIA NOSTROCACEAE</b>  <b>FAMIGLIA STIGONEMATACEAE</b>  <b>FAMIGLIA CHROCOCCACEAE</b>  <b>FAMIGLIA OSCILLATORIACEAE</b></p> <p><b>BATTERI ANAEROBI FACOLTATIVI</b>            - Klebsiella pneumoniae, K. rubraearum            - Bacillus polymyxa, B. macerana, forse altri bacilli            - Enterobacter aerogenes, Ent. cloacae            - Escherichia intermedia, E.coli</p> <p><b>BATTERI FOTOTROFI</b>            - Rhodospirillum rubrum, Rhodospseudomonas palustris            - Rhodomicrobium</p> <p><b>I SOLFOBATTERI COLORATI</b>            - Chlorobium thiosulfatophilum            - Chromatium vinosum, C.minutissimum            - Ectothiorhodospira shaposhnikovii</p> <p><b>MICRORGANISMI AEROBI OBBLIGATI</b>            - Clostridium pasteurianum, C.butyrlicum, numerosi altri clostridi</p> <p><b>BATTERI SOLFORIDUCENTI</b>            - Desulfovibrio desulfuricans, D.vulgaris, D.gigas            - Desulfotomaculum orientis, D.ruminis</p>
--

### Proteolisi

L'azoto presente nelle proteine è "bloccato" e non è disponibile come sostanza nutritiva per le piante. Perché questo azoto organico sia reso libero per essere riutilizzato, il primo processo che deve aver luogo è l'idrolisi enzimatica delle proteine (proteolisi). Esso è svolto da microrganismi capaci di elaborare proteinasi extracellulari che convertono le proteine in unità più piccole (peptidi). I peptidi vengono, quindi, attaccati da peptidasi ed il processo conduce alla liberazione di singoli amminoacidi.

Alcune specie batteriche elaborano grandi quantità di enzimi proteolitici. Fra i più attivi

sono alcuni clostridi, molti funghi ed actinomiceti. Le peptidasi, però, sono presenti in grande quantità nei microrganismi.

### Ammonizzazione

I prodotti finali della proteolisi sono gli amminoacidi, i quali, nel suolo sono destinati ad essere utilizzati come sostanze nutritive dai microrganismi o ad essere degradati dall'attacco microbico. La liberazione di azoto da questi composti è attuata per deaminazione, cioè per rimozione del gruppo amminico. Sebbene i microrganismi presentino parecchie varianti delle reazioni di deaminazione, uno dei prodotti finali è sempre l'ammoniaca (ammonizzazione). Il destino dell'ammoniaca varia in relazione alle condizioni presenti nel suolo.

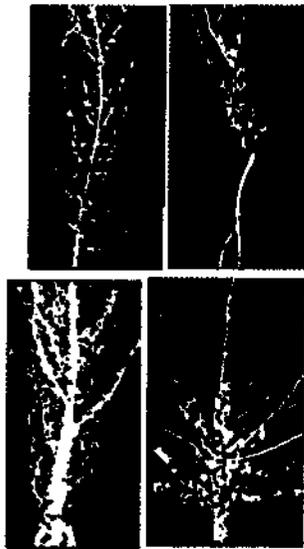


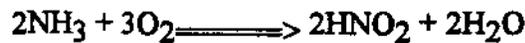
Fig.4 - Noduli radicali prodotti da ceppi di batteri su leguminacce

### Nitrificazione

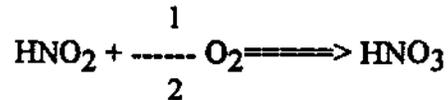
L'ossidazione dell'ammoniaca a nitrato viene chiamata nitrificazione ed è una delle più importanti attività di alcuni batteri autotrofi; le reazioni di ossidazione forniscono l'energia di cui questi microrganismi hanno esigenza per i loro processi cellulari. Per quanto riguarda

la fertilità del suolo, il prodotto della reazione (nitrato) fornisce la forma di azoto più disponibile alle piante. La nitrificazione è svolta in due tappe da batteri specifici:

1) ossidazione di ammoniaca a nitrito per opera di Nitrosomonas



2) ossidazione di nitrito a nitrato per opera di Nitrobacter



### Riduzione dei nitrati ad ammoniaca

Parecchi batteri eterotrofi sono capaci di convertire i nitrati in nitriti o in ammoniaca, un processo che si svolge normalmente in condizioni anaerobiche. L'ossigeno del nitrato serve da accettore per gli elettroni e l'idrogeno. Il processo implica parecchie reazioni e il risultato globale è :



### Denitrificazione

Certi microrganismi sono capaci di trasformare i nitrati in azoto gassoso in un processo chiamato denitrificazione, che conduce ad una perdita netta di azoto dal suolo



Alcuni degli organismi responsabili di questa reazione sono

Micrococcus denitrificans, Serratia, Pseudomonas, Achromobacter.

E' probabile che diventi un grave problema nei terreni saturi di acqua e contenenti abbondanti sostanze organiche.

## 2.2 Il ciclo del carbonio

### Fissazione dell'anidride carbonica

La sorgente ultima dei composti organici del carbonio è l'anidride carbonica presente nell'atmosfera ( o disciolta nell'acqua) (Fig.5).

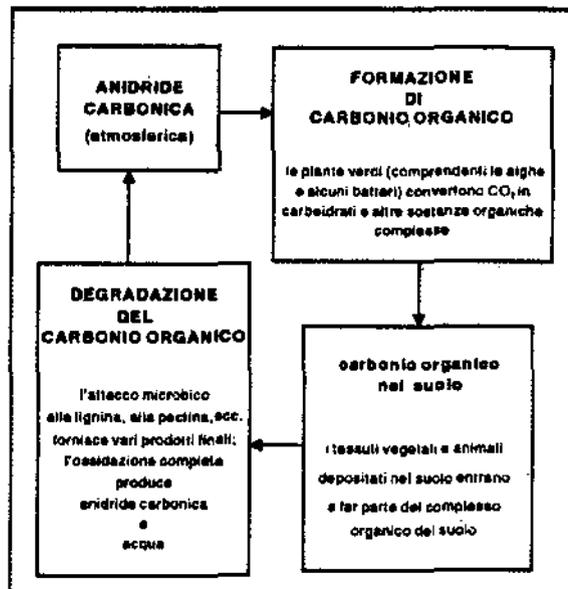
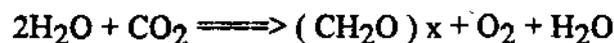


Fig.5 - Il ciclo del Carbonio

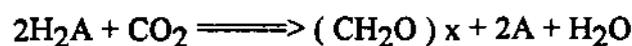
Le piante verdi e le alghe sono i più importanti agenti di fissazione dell'anidride carbonica



(in presenza di luce e del pigmento verde clorofilla).

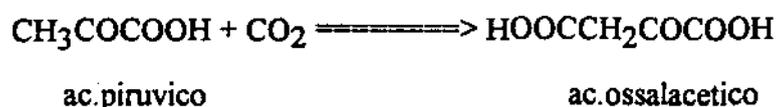
$\text{CH}_2\text{O}$  rappresenta l'unità fondamentale della struttura dei carboidrati.

Parecchi gruppi di batteri sono caratterizzati dalla capacità di compiere la fotosintesi, ma, a differenza delle piante non producono ossigeno come uno dei prodotti finali



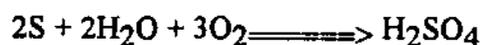
$\text{H}_2\text{A}$  rappresenta il termine generale per un composto inorganico o per un composto organico ridotto dello zolfo.

La fissazione dell'anidride carbonica da parte di microrganismi eterotrofi è comune tra i batteri. Un esempio particolare di questo tipo di reazione è:

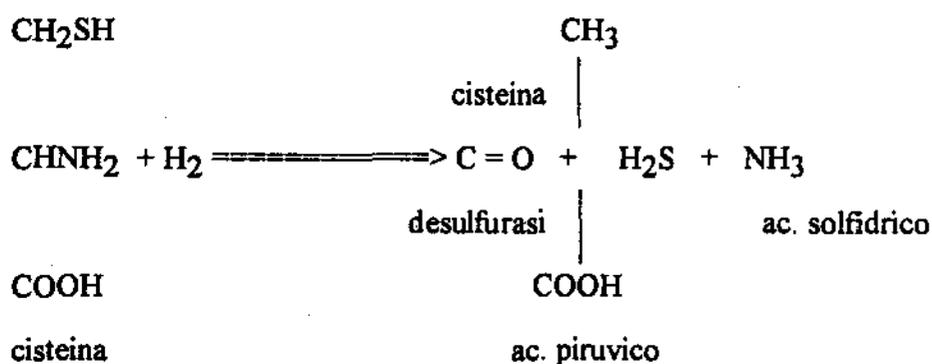




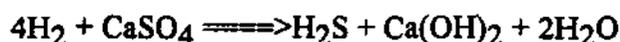
1) lo zolfo, nella sua forma elementare, non può essere utilizzato dalle piante o dagli animali; ma certi batteri sono capaci di ossidare lo zolfo a solfati; per esempio il Thiobacillus thiooxidans, un batterio autotrofo. La reazione è



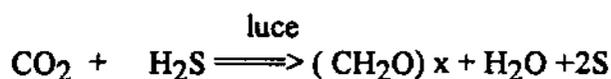
2) il solfato è assimilato dalle piante e incorporato in amminoacidi contenenti zolfo e poi in proteine. La degradazione delle proteine libera gli amminoacidi; lo zolfo contenuto in alcuni amminoacidi viene liberato dall'attività enzimatica di molti batteri eterotrofi. La reazione è:



3) i solfati possono anche essere ridotti ad acido solfidrico dai microrganismi del suolo. Per esempio dal genere desulfotomaculum; la reazione è:



4) l'acido solfidrico, prodotto dalla riduzione dei solfati e dalla decomposizione degli amminoacidi, è ossidato a zolfo elementare. Questa reazione è caratteristica di certi solfobatteri pigmentati (fotosintetizzanti) e può essere così riassunta:



Le trasformazioni dell'azoto, del carbonio, dello zolfo e dei loro composti rappresentano solo una parte della complessa attività dei microrganismi del suolo. Infatti l'attività metabolica dei microrganismi

- a) solubilizza il fosfato dai fosfati insolubili di calcio, ferro e alluminio;
- b) libera i fosfati dai composti organici quali gli acidi nucleici ;
- c) trasforma gli ossidi insolubili di ferro e manganese in sali manganosi e ferrosi solubili e viceversa.

Da questi esempi di trasformazioni biogeochimiche che si svolgono nel suolo, dovrebbe risultare evidente che i microrganismi esplicano numerose funzioni essenziali che contribuiscono alla produttività del suolo stesso.

### **3. Possibilità di inquinamento del suolo.**

Il suolo può essere inquinato da sostanze non naturali che, trascinate dalle acque meteoriche o superficiali, arrivano ad esso accidentalmente o sistematicamente, in modo diffuso o localizzato, in quantità rilevante o anche esigua ma con composti a volte altamente tossici (3).

Le sostanze chimiche, organiche o inorganiche possono raggiungere il suolo attraverso le seguenti vie:

- 1) diffusione costante da sistemi produttivi
- 2) diffusione accidentale da sistemi produttivi (improvviso guasto di apparecchiature di processo)
- 3) percolamento da sistemi superficiali di ritenuta per il contenimento dell'inquinante prima dell'allontanamento
- 4) perdite da tubature e da cisterne interrato
- 5) smaltimento improprio superficiale
- 6) uso di antiparassitari ed erbicidi in agricoltura
- 7) rovesciamenti accidentali anche dovuti ad incidenti stradali, deragliamenti di convogli ferroviari, ecc.

#### 4. Migrazione inquinanti

Nell'interno del suolo il contaminante subisce una serie di processi che influiscono positivamente o negativamente sul suo destino. Il suolo può quindi controllare, attraverso processi di tipo chimico, fisico e biologico il destino dei contaminanti comunque essi siano: solubili o non solubili, organici o inorganici, biodegradabili o non (Fig.7).

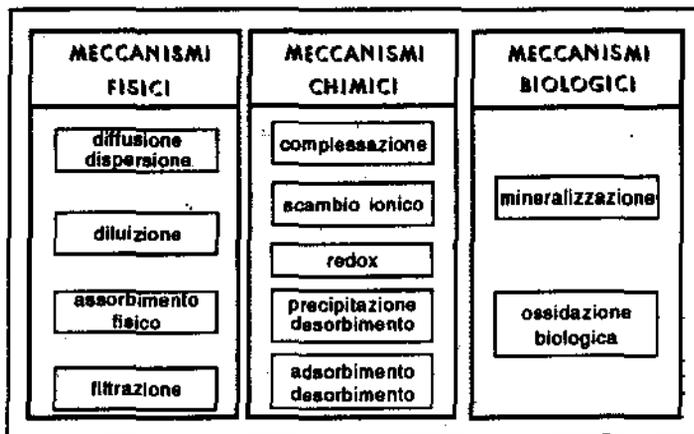


Fig. 7 - Meccanismi che intervengono nella migrazione di inquinanti

##### 4.1 Meccanismi fisici

-*Diffusione molecolare*: è il movimento di un componente chimico da una zona ad alta concentrazione ad una a bassa concentrazione

-*Dispersione idrodinamica*: è la distribuzione di un inquinante in funzione della velocità di passaggio attraverso i pori del suolo (Fig.2)

-*Diluzione*: è il passaggio del fluido dalla zona non satura a quella satura

-*Assorbimento fisico*: è l'assorbimento del contaminante al particolato in funzione delle forze di Van der Waals, delle proprietà idrodinamiche ed elettrocinetiche delle particelle del suolo. Questo è un meccanismo importante per la riduzione di batteri e virus nel terreno

-*Filtrazione*: è la ritenzione selettiva in un piccolo strato di suolo in funzione della granulometria composta che caratterizza il suolo. Anche questo processo consente il trattenimento di una grande quantità di sostanze.

Assorbimento e filtrazione, proprio per la loro efficienza ritentiva, sono stati traslati dalla

natura in impianti tecnologici di depurazione (cfr. potabilizzatori).

#### 4.2 Meccanismi chimici

*-Precipitazione - dissoluzione:* sono i processi che avvengono in un fluido quando la concentrazione del contaminante è più alta o più bassa di quella dello stato di equilibrio.

*-Adsorbimento e desorbimento:* sono l'adesione o il rilascio di ioni o molecole alla superficie delle particelle solide nel suolo, come silicati stratificati, idrossidi e sostanza organica.

Il vero processo di adsorbimento è uno scambio ionico e principalmente cationico. La capacità di scambio dipende da:

- grandezza della particella
- quantità di materiale con particelle piccole (argilla)
- quantità di sostanza organica presente
- pH del suolo.

Il processo di adsorbimento è esotermico al contrario di quello di desorbimento, pertanto, un aumento di temperatura riduce la possibilità che avvenga l'adsorbimento e favorisce il desorbimento.

L'adsorbimento è un meccanismo comune associato con la migrazione nel suolo di contaminanti organici ed inorganici e di metalli.

*Complessazione:* è la ricerca degli ioni metallici (Cu, Cd, Fe, ecc.) con gli anioni inorganici (cloruri, fosfati, ecc) e con leganti organici (chelazione) per formare ioni organici complessi e complessi organometallici.

*Scambio ionico:* è lo scambio tra uno ione in soluzione e un altro ione che si trova sulla superficie di un qualsiasi materiale attivo che si trova nel suolo.

*Ossido-riduzione:* le reazioni di riduzione ed ossidazione sono importanti in quanto hanno materiale effetto sulla solubilità dei contaminanti.

### **4.3 Meccanismi microbiologici**

Questi meccanismi hanno notevole influenza sulla migrazione di contaminanti, anche tossici, con effetto sulle reazioni di ossidazione e riduzione, di mineralizzazione, di immobilizzazione, di precipitazione e dissoluzione e di complessazione.

Con la mineralizzazione le sostanze organiche, i tessuti microbici ed i complessi organico-inorganici sono convertiti in sostanze inorganiche ed i metalli attraverso l'assimilazione biologica possono essere trasformati in tessuti microbici e quindi immobilizzati o trasferiti con essi ad altri organismi attraverso la catena alimentare. Infine i complessi organici che si sono formati per sintesi e degradazione biologica si possono combinare con metalli ed altri elementi presenti nel suolo dando vita ad altri processi di assorbimento, mobilizzazione, complessazione, ecc.

## **5. Inquinamento da smaltimento dei rifiuti solidi nel suolo**

I sistemi di smaltimento che hanno una stretta relazione con il suolo sono il compostaggio e la discarica.

### **5.1 Il compostaggio**

E' un sistema di separazione della frazione organica che, dopo trattamento di selezione e maturazione, viene utilizzata nel suolo sotto forma di *compost*.

Il compost non è un fertilizzante, in quanto povero degli elementi nutritivi fondamentali: azoto, fosforo e potassio; è invece un materiale organico a maturazione avviata che può essere ben utilizzato come ammendante per migliorare i suoli carenti di sostanze organiche.

Dal punto di vista del rapporto del compost con il suolo, questo materiale potrebbe contenere, a causa della sua origine, materiale indesiderato macroscopico e sostanze tossiche. L'attuazione del D.P.R. 915/82 prevede alcune prescrizioni che possono essere sintetizzate in:

- temperatura minima garantita di 55°C per tre giorni
- contenuto massimo di materiale inerte

- contenuto di sostanza organica maggiore del 40%, di cui il 20% di sostanza umificata
- rapporto C/N minore di 30
- contenuto massimo di metalli pesanti
- contenuto minimo di azoto, fosforo e potassio
- limitazione nell'uso secondo la destinazione della coltura

## **5.2 La discarica**

La discarica è uno dei sistemi più diffusi di smaltimento dei rifiuti solidi sia urbani che industriali. Il sistema consiste nell'interramento controllato dei rifiuti con modalità e precauzioni tali da evitare inquinamenti all'aria, all'acqua ed al suolo. L'utilizzazione del sistema della discarica è attualmente regolamentata dalle disposizioni per l'attuazione del D.P.R. 915/82. La discarica viene definita come uno stoccaggio definitivo sul suolo e nel suolo dei rifiuti e deve essere progettata ed eseguita secondo le caratteristiche dei rifiuti che devono essere smaltiti.

### **5.2.1. Il percolato**

Nei riguardi del suolo il percolato è il reffuo più pericoloso che si forma adottando il sistema della discarica. Il percolato, prodotto dalla composizione dei rifiuti, contenente contaminanti organici ed inorganici, estratti per azione solvente dell'acqua meteorica nell'ambiente acido conseguente la decomposizione stessa, può essere inquinante per il suolo ed essere una delle cause della contaminazione delle acque di falda.

Il tipo e l'intensità dell'inquinamento dipendono sia da quantità e qualità del percolato. La composizione del percolato varia così ampiamente che è praticamente impossibile fornire dati medi accettabili.

Numerose ricerche hanno dimostrato che può esistere una popolazione batterica nei percolati derivati da rifiuti solidi urbani e da alcuni rifiuti industriali, anche se il percolato per il suo contenuto di sostanze decisamente tossiche, dovrebbe avere, e assai spesso ha,

Atti, battericida (tabella n.2).

La (tabella) riguarda i virus sia la discarica che il percolato non sono ambienti favorevoli al (tabella), anche se non sono noti i meccanismi di distruzione virale.

Tab. 2 - Batteri e indicatori batteriologici identificati nei percolati

GRUPPI INDICATORI		
Streptococchi fecali	Coliformi fecali	Coliformi totali
Streptococchi sp.	Achromobacter sp.	Serratia marcescens
S. faecalis var. liquefacens	Bacillus sp.	Acinetobacter sp.
A. typical a. faecalis var.	Clostridium fallax	Enterobacter cloacae
S. faecalis II biotipo	Clostridium sp.	Stenylotococcus albus
S. faecalis III biotipo	Aeromonas sp.	Pseudomonas sp.
S. duroni	Listeria monocytogenes	Flavobacterium sp.
S. equinus	Micrococcus sp.	Lactobacillus sp.
S. coli	Moraxella sp.	Bacillus sp.
Salmonella typhimurium	Neisseria sp.	Propionibacterium sp.

Atti, (tabella), infine, è noto sulla presenza di funghi e parassiti.

## 6. Inquinamento da effluenti

### 6.1. Effluenti da allevamenti zootecnici

Per quanto concerne l'inquinamento del terreno da effluenti, uno dei maggiori problemi di contaminazione è rappresentato dalla concentrazione territoriale di allevamenti zootecnici.

In molti mangimi per suini vengono arricchiti in microelementi.

I principali tra questi, Cu e Zn, vengono introdotti nell'alimento completo con una dose massima, per la legge italiana, di 125 - 250 ppm rispettivamente e passano nelle feci e nelle urine in proporzione del 70 - 80% (Cu) e del 92 - 96% (Zn).

Inoltre, che questi microelementi, comunque pervenuti sul terreno, tendono ad accumularsi negli strati superficiali, con il rischio potenziale di effetti tossici per le piante.

La conseguente potenziale pericolo per le catene alimentari, anche se nei suoli il passaggio dei microelementi dal terreno alle piante è fortemente ostacolato dagli

elevati tenori di calcare, pH e capacità di scambio ionico.

Dal punto di vista chimico, è stato recentemente dimostrato come la concimazione organica a lungo termine produca variazioni di rilievo non tanto sulla quantità totale dei cationi scambiabili, quanto sulla loro ripartizione nel complesso di scambi. Il catione scambiabile che diventa più facilmente accessibile è quello più importante per la nutrizione vegetale e cioè il potassio (4).

Dal punto di vista fisico è stato dimostrato che i liquami suini aumentano la porosità totale del suolo (5).

Mentre numerosi sono gli apporti sperimentali concernenti l'aspetto chimico ed agronomico del problema, meno numerosi e spesso contrastanti sono i lavori riguardanti l'aspetto biologico (6). Come parametri dell'attività biologica vengono presi di solito in considerazione:

- la carica microbica totale ed i principali gruppi fisiologici del terreno (schizomiceti eterotrofi aerobi, azotofissatori aerobi ed anaerobi, ammonificanti, cellulolitici aerobi ed anaerobi)

- la capacità di nitrificazione

- l'attività di alcuni enzimi (la deidrogenasi, l'ureasi e la fosfatasi)

Recenti ricerche hanno dimostrato che dei gruppi microbici sopra riportati, solo quelli coinvolti nella nitrificazione risentono dei trattamenti con liquami, fanghi e letame di allevamenti zootecnici.

I liquami suini influenzano negativamente i microrganismi azotofissatori del terreno in maniera tanto più elevata quanto minore è la depurazione da essa subita. L'effetto inibente riscontrato nei terreni concimati con le dosi più elevate di liquame tal quale è legato, tra l'altro, al maggiore contenuto di azoto presente in questo tipo di liquame che accumulandosi nel terreno provoca la riduzione dell'azotofissazione biologica. Comunque, l'azione inibente del liquame tal quale è da imputarsi principalmente alla sostanza organica non solubile (solidi sospesi) ed ai composti organici ed inorganici con peso inferiore a 10.000 D.

## 6.2 Effluenti da impianti di depurazione dei reflui urbani

A seguito della messa in opera degli impianti di depurazione, si calcola che si producono giornalmente sul territorio nazionale circa 10.000 - 12.000 tonnellate di fanghi disidratati, che rappresentano un concentrato degli eventuali contaminanti chimici e biologici inizialmente presenti nelle acque reflue.

I reflui della linea acqua, ancora con titoli microbici elevati (spesso superiori a 10.000 colifecali/100 ml.), sversati nei corpi idrici superficiali, contribuiscono alla contaminazione di questi ultimi ed al loro arricchimento in nutrienti (azoto e fosforo). Nessuno dei metodi disponibili per lo smaltimento dei prodotti della linea fanghi (incenerimento, discarica controllata, utilizzazione in agricoltura), è risultato alieno da inconvenienti almeno dal punto di vista igienico-sanitario (7).

Per quanto riguarda l'utilizzo agricolo, esso risulta complicato dal fatto che la domanda di concime si limita al massimo ad un periodo di quattro mesi all'anno e che lo spargimento sui terreni agricoli di questo sottoprodotto della depurazione può comportare, per la sua composizione chimica e per la sua carica batterica, virale e biologica, un inquinamento del suolo e degli acquiferi, nonché effetti negativi sui vegetali, sugli animali e sulla salute umana.

Problemi analoghi possono sorgere con l'uso irriguo dei reflui della linea acqua, anche se in tal caso ci si trova di fronte ad una maggiore diluizione degli agenti chimici e microbiologici.

Le implicazioni sulla salute pubblica correlate allo spargimento sui suoli agricoli dei reflui,

sia della linea acqua o di quella fanghi, sono legate soprattutto al destino di:

1) patogeni ed indicatori batterici

2) inquinanti organici in traccia

3) inquinanti inorganici.

### 6.2.1 Smaltimento dei reflui della linea acqua

Le acque reflue e i fanghi derivanti dagli impianti di trattamento contengono quantità enormi di microrganismi di origine sia fecale sia esogena. Dopo lo smaltimento sul terreno, questa componente batterica rimane intrappolata nei primi strati del suolo grazie a meccanismi di filtrazione, sedimentazione, adsorbimento. Qui, seppure in piccole quantità, i microrganismi possono sopravvivere anche per lunghi periodi, in funzione di numerosi fattori ambientali quali temperatura, umidità, irraggiamento solare, presenza di sostanza organica ed assenza di flora microbica concorrente.

Le caratteristiche chimiche del refluo possono influenzare la sopravvivenza sia dei batteri enterici sia di quelli autoctoni. I detersivi, ad esempio, come tutti i tensioattivi, sono antisettici ed alterano, in diversa misura, l'equilibrio microbico del suolo deprimendone l'attività respiratoria e quella nitrificante. In linea generale si può concludere che nella fertirrigazione la componente batterica nella sua integrità ha un impatto sanitario molto limitato.

L'irrigazione di colture con effluenti da impianti di trattamento ha messo in evidenza in tutti i casi contaminazione virale delle acque di falda fino alla profondità di 27,5 metri. I virus sopravvivono per periodi lunghi, variabili da tipo a tipo; mediamente possono persistere nel suolo circa un mese.

Il rischio di contaminazione ambientale legato all'uso di reflui urbani in agricoltura esiste per quello che è l'aspetto biologico di trasmissione di uova di vermi e cisti di protozoi (8). Ad una riduzione del 99% degli organismi indicatori, negli impianti di depurazione, corrisponde al massimo un abbattimento dell'80% delle uova di Ascaris e del 54% delle cisti di Entamoeba coli.

Oltre alle conseguenze biologiche, che potrebbero essere connesse con lo smaltimento a terra dei reflui trattati della linea acqua, non si possono sottovalutare le modificazioni chimiche e fisiche che indirettamente potrebbero influenzare la biosfera del suolo. La presenza di alti valori di SAR può portare a salinificazione; le concentrazioni di metalli alcalini e alcalino-

terrosi tipici del refluo, non in sintonia con le richieste delle piante, che prediligono ioni  $K^+$  e  $Mg^{++}$  a  $Na^+$  e  $Ca^{++}$ , determinano formazione di croste superficiali sul suolo. Ciò favorisce lo scorrimento delle acque impedendo la loro infiltrazione per la ricarica delle falde.

I risultati potrebbero essere l'impoverimento di portata delle acque sotterranee, la subsidenza del terreno, l'aridità del suolo e la sua deprivazione di aria. Le conseguenze sono la diminuzione di produttività agraria e la modificazione delle biocenosi che colonizzano il terreno.

Nei reflui, inoltre, la presenza di sostanze tossiche per le piante, quali quelle contenenti boro, o la stessa disinfezione attuata per ridurre i problemi sanitari, determinano clorosi sulle piante e addizione di composti tossici cloroorganici negli orizzonti del suolo. Queste sostanze possono raggiungere anche gli acquiferi.

### **6.2.2 Smaltimento dei reflui della linea fanghi**

L'apporto dei fanghi, siano essi aerobi o anaerobi, compostati e non, provoca un aumento della popolazione microbica ed una esaltazione dei processi microbiologici nel suolo e nella rizosfera, che si traducono spesso in una aumentata velocità di germinazione delle piante. La presenza, tuttavia, di batteri, virus e cisti di parassiti (protozoi e metazoi) rimasti intrappolati nei fanghi, può rappresentare un rischio igienico ed una limitazione per questa pratica di smaltimento.

La carica finale batterica, biologica e virale dipende dai tipi di trattamento cui soggiacciono i fanghi prima del loro uso.

Un buon trattamento digestivo aerobico, ed in misura maggiore quello anaerobico, riduce notevolmente la presenza di agenti patogeni batterici e virali (oltre il 90%) pur non raggiungendo mai la completa igienizzazione. Non va trascurato l'aspetto tossicologico in questa forma di riciclo.

Acque reflue e fanghi sono arricchiti proprio grazie all'attività umana in metalli pesanti e

molecole organiche difficilmente biodegradabili. Prima di consentire il riciclo di una risorsa, è quindi la qualità chimica da controllare, ciò considerando che l'inquinamento chimico oltre a contaminare i vegetali può, più facilmente di quello microbiologico, raggiungere le acque di falda percolando attraverso il suolo.

### **7. Inquinamento del terreno da prodotti chimici per l'agricoltura**

Il caso più comune di inquinamento da pratiche agricole è oggi rappresentato dal largo impiego di prodotti organici ad azione erbicida come l'atrazina che è l'erbicida più diffuso in tutto il mondo (9-10). Gli erbicidi triazinici sono erbicidi particolarmente adatti ad eliminare le erbe infestanti del mais che è resistente all'atrazina. Il modo di azione, oltre che nell'indurre clorosi, inibizione della crescita e necrosi, consiste essenzialmente nella inibizione del fotosistema 2 del cloroplasto, nel quale gli elettroni sono rimossi dall'acqua per liberare ioni idrogeno ed  $O_2$ . L'inibizione di questo processo, noto come reazione di Hill, ha come risultato l'interruzione della produzione di ATP e di NADH.

E' evidente che ogni effetto causato dall'impiego di un erbicida, dall'efficacia agronomica al potere inquinante, è condizionato o direttamente provocato dal suo comportamento nel terreno. Per quanto riguarda l'aspetto fisico del movimento degli erbicidi nel terreno, l'importanza delle conoscenze sul movimento è legata a due problemi principali:

- a) quello dell'efficacia del trattamento erbicida
- b) quello del pericolo di inquinamento dell'ambiente.

Il moto di una sostanza erbicida può manifestarsi in maniere diverse (11). Si possono distinguere forme di moto semplici e forme combinate. Queste ultime rappresentano il caso più frequente (Fig. 8 e 9).

Una delle più importanti interferenze dello stato solido con la sostanza erbicida è costituita dall'adsorbimento di questa alla superficie delle particelle solide, che è più vistoso su argille e materiali umici. Oltre l'adsorbimento da parte dei costituenti organo-minerali del terreno, i processi a carico degli erbicidi possono essere diversi:

- trasformazione ad opera di reazioni chimiche o enzimatiche in prodotti residui di natura e proprietà diverse
- assorbimento da parte degli organismi viventi ed eventuale ingresso nelle catene alimentari
- eliminazione dal sistema per volatilizzazione, percolazione, degradazione chimica o biologica.

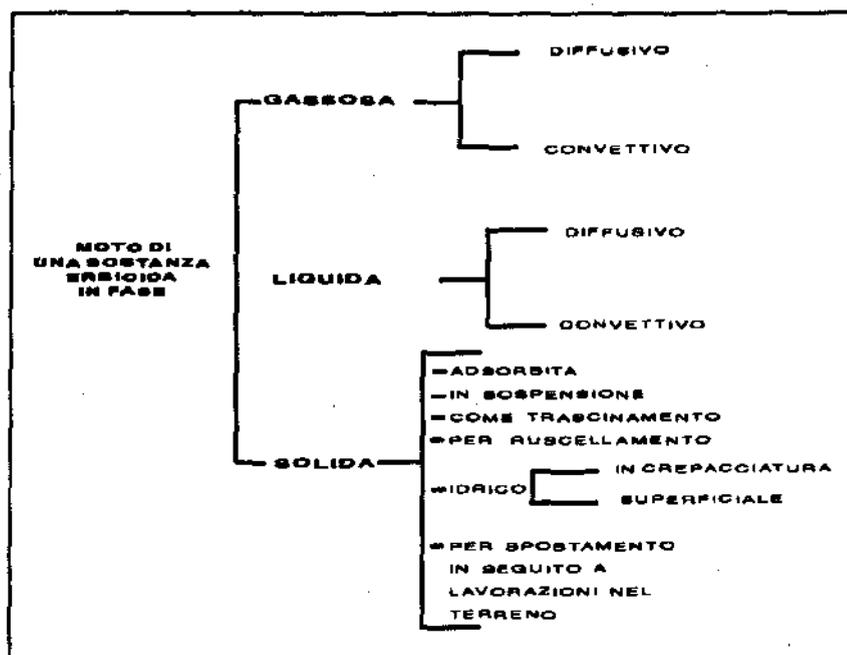


Fig. 8 - Il moto degli erbicidi nel suolo

I principali processi di degradazione chimica sono: idrolisi, ossidazione e isomerizzazione. Alcuni costituenti del terreno sono in grado di catalizzare queste reazioni. Ad esempio le argille catalizzano l'idrolisi di atrazina e di altre triazine assorbite su di esse. Anche gli ioni idrogeno agiscono da catalizzatori della reazione.

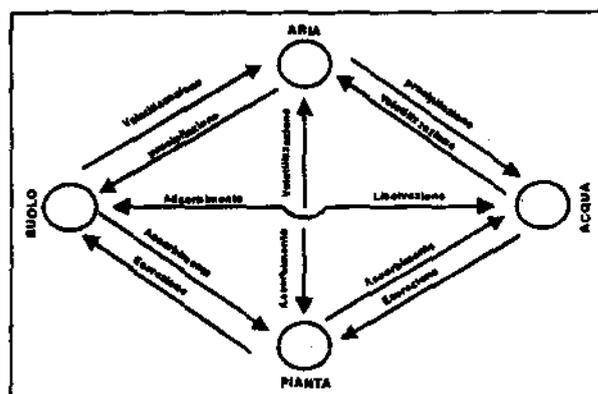


Fig. 9 - Distribuzione di un erbicida nell'ambiente

Pertanto, l'esistenza di un pH più alto in corrispondenza delle superfici colloidali esalta la trasformazione dell'atrazina in idrossiatrazina.

Le proprietà che portano a definire un prodotto chimico per l'agricoltura come inquinante sono la tossicità e la resistenza alla degradazione biologica. La non biodegradabilità è dovuta al fatto che alcuni di questi composti presentano una struttura chimica non riscontrabile nelle sostanze organiche naturali, pur cui non si sono ancora evoluti microrganismi che possiedono il codice genetico necessario alla sintesi degli enzimi indispensabili per la degradazione di queste molecole. Quando un composto non è biodegradabile si accumula nella biosfera e negli organismi viventi arrecando danni ben comprensibili.

Due fondamentali processi biochimici sono coinvolti in natura nella biodegradazione dei composti organici

- la mineralizzazione
- la co-ossidazione o co-metabolismo

Tutti e due questi processi sono strettamente correlati con la selezione naturale dei microrganismi.

Con il termine mineralizzazione si intende quel processo secondo il quale i composti organici vengono trasformati completamente in anidride carbonica, acqua e materiale cellulare dai microrganismi del terreno. E' il processo di restituzione all'ambiente degli elementi minerali.

La co-ossidazione (o co-metabolismo) è un termine proposto per descrivere un sistema biologico in cui un substrato organico non utilizzabile per la crescita microbica viene ossidato parzialmente e simultaneamente ad un altro composto organico che invece viene utilizzato come fonte di carbonio e di energia.

La selezione dei microrganismi co-ossidanti si può verificare quando, nell'ambiente è presente una sostanza chimica analoga, ma biodegradabile che è responsabile della selezione. Questo processo richiede tempi molto lunghi; questo è il motivo per cui la

degradazione per co-ossidazione dei composti "persistenti" può avvenire in natura solo con estrema lentezza.

### **7.1 Parametri chimici e microbiologici influenzati dagli erbicidi**

L'influenza degli erbicidi triazinici sul ciclo dell'azoto è stata indagata a fondo. I risultati ottenuti hanno permesso di verificare che l'uso, ad esempio, dell'atrazina alla dose di 6 Kg/ha, provoca un accumulo nel suolo di nitrati.

L'influenza dell'atrazina sul ciclo dell'azoto è stata studiata anche dal punto di vista microbiologico. Nel terreno l'atrazina anche a concentrazioni più alte di quelle normalmente usate nelle pratiche agronomiche, non influenza l'azotofissazione aerobia ed anaerobia e la denitrificazione, mentre l'erbicida provoca una forte inibizione del processo di ammonificazione.

Si è notata, inoltre, una inibizione del processo di ossidazione dei nitriti a nitrati a livello della rizosfera. Tale processo è molto sensibile e risente della presenza di qualsiasi sostanza chimica aggiunta al suolo, tanto da venir scelto da alcuni ricercatori come **indicatore biologico** (12).

Per quanto riguarda l'influenza degli erbicidi triazinici sulla produzione di sostanze fitoormonali in terreni coltivati a mais, le diverse dosi somministrate ai suoli non hanno influenzato la produzione di citochinine, mentre la quantità di gibberelline e di auxine è apparsa notevolmente inferiore al controllo nei terreni trattati con 4 e 6 Kg/ha di atrazina, sia nel suolo che nella rizosfera.

### **7.2 Nuovi metodi di monitoraggio microbiologico dell'inquinamento del suolo da erbicidi**

La ricerca di nuovi parametri di valutazione degli effetti degli erbicidi sulla ecologia microbica del suolo, ha evidenziato l'azione di tale sostanze sulla microflora fotosintetica e su alcune fondamentali funzioni rizosferiche, quali l'azotofissazione associativa e la

produzione di etilene. Il gruppo piu' sensibile è quello dei cianobatteri che subisce una drastica riduzione nel numero e nella composizione speciologica in corrispondenza delle dosi più alte di erbicida.

Anche le Diatomee risentono in misura accentuata dell'effetto dell'atrazina, con una risposta a diversi mesi di distanza dal trattamento. L'impiego delle microalghe come organismi test, permette il dosaggio agronomico dell'erbicida ossia la determinazione della dose pratica necessaria e sufficiente ad ottenere l'effetto diserbante.

Indagini estese alla rizosfera utilizzano semi germinati di panico e di mais (Panicum miliaceum e Zea mays), rispettivamente per rilevare l'influenza di erbicidi come l'atrazina sull'azotofissazione associativa, indotta con inoculazione di Azospirillum lipoferum e sulla produzione rizosferica di etilene. Il saggio è molto sensibile ed affidabile monitore microbiologico dell'effetto dell'atrazina.

Nell'ambito di quantità di atrazina comprese tra 0,5 e 5 ppm l'attività nitrogenasica dell'associazione rizosferica viene fortemente depressa.

L'altro parametro preso in esame riguarda la produzione rizosferica di etilene, che tra i composti volatili formati nel suolo, è un indice significativo delle interazioni biochimiche pianta - microflora. L'atrazina agisce sulla fase di latenza del processo di produzione di etilene; tale fase aumenta di 24 ore alle dosi di 0,5 - 1,0 ppm e di 48 - 72 ore con 3 - 5 ppm. Tale effetto si manifesta sia sulla produzione di etilene rizosferica che su quella propria del terreno. La concordanza tra i responsi all'atrazina basati sull'impiego della microflora fotosintetica e quelli basati sulle funzioni rizosferiche, dimostra nell'un caso e nell'altro effetti persistenti dopo oltre un anno dai trattamenti. La soglia critica alla quale si rilevano i maggiori effetti sull'ecologia microbica è di 3 Kg/ha di atrazina, mentre alle dosi inferiori gli effetti sono meno marcati e reversibili.

## 8. Lo studio della taxocenosi di artropodi nella valutazione naturalistica del territorio

Gli animali formano comunità complesse, ricche di specie, con una fitta serie di interrelazioni intraspecifiche, interspecifiche e con l'ambiente fisico; ne consegue che le comunità animali possono fornire una serie pressochè illimitata di informazioni sullo stato di alterazione dell'ambiente. Sono in particolare gli invertebrati, a causa del numero della specializzazione e della sensibilità alle variazioni ambientali, a funzionare efficacemente quali indicatori ecologici. Le ricerche faunistiche tradizionali sono di regola finalizzate alla conoscenza delle specie che vivono in un certo luogo, con una particolare attenzione alle specie rare. Ai fini ecologici appare invece di particolare interesse uno studio che prenda in considerazione anche gli aspetti quantitativi con l'indicazione delle specie dominanti nelle varie comunità animali.

Di regola non può essere affrontato lo studio di tutta la comunità animale di un sito; si concentrano quindi gli sforzi su pochi gruppi sistematici che devono possedere queste qualità:

- essere censibili
- essere identificabili in tempi ragionevoli
- essere conosciuti dal punto di vista ecologico e biogeografico
- possedere un certo significato quali indicatori ecologici.

Questi settori di comunità sono individuati con il termine di taxocenosi .

Ad una alterazione negativa dell'ambiente dovrebbero corrispondere le seguenti reazioni a livello di comunità animale:

- 1) diminuzione del numero di specie
- 2) aumento della dominanza
- 3) diminuzione della diversità.

Un dato fondamentale fornito dall'autoecologia riguarda il numero di specie presenti. Questo si mantiene piuttosto costante per ambienti omogenei. L'abbondanza di individui di ogni specie si traduce in una abbondanza di attività. I valori di intensità di attività, sia per i

singoli periodi che per l'intero anno, possono riferirsi anche alle taxocenosi in toto (somme delle abbondanze delle singole specie); questo valore complessivo indica la produttività di un ambiente per quanto riguarda il taxon considerato.

Quanto fin qui esposto introduce il concetto di diversità. La diversità di una comunità aumenta:

- 1) se aumenta il numero di specie presenti
- 2) se le abbondanze relative delle specie diventano più uniformi.

Il concetto di diversità e' spesso richiamato con riferimento alla stabilità di una comunità'.

### **8.1 Influenza degli erbicidi sulla pedofauna**

Nel suolo sono presenti numerosi tipi di organismi che interagiscono tra loro dipendendo in pratica l'uno dall'altro. Disponibilità di cibo, parassitismo e predazione sono meccanismi che tendono a mantenere inalterato nel tempo la densità di popolazione dei vari organismi. Se anche un solo anello di questa catena alimentare viene ad essere modificato sia in eccesso che in difetto, tutto l'equilibrio viene alterato con riflessi anche cospicui sulla qualità del terreno. Gli animali ipogei, cioè quelli che vivono negli anfratti del terreno o si scavano in esso delle gallerie, svolgono in questo quadro complesso la loro importante funzione.

Dal punto di vista della dimensione gli animali del suolo possono essere suddivisi in 5 raggruppamenti: **nanofauna** (i più piccoli Protozoi), **microfauna** (Rizopodi, Rotiferi ed alcuni Nematodi), **mesofauna** (principalmente Acari e Collemboli), **macrofauna** (Euchitreidi, Diplopodi, Isopodi, Coleotteri, Ditteri, Imenotteri), **megafauna** (Lumbricidi, Molluschi e Mammiferi). Tra i microartropodi particolare risalto ha la predazione operata da Acari e Chilopodi sulle popolazioni di Collemboli. Un altro tipo di suddivisione tiene conto di come viene assunto l'ossigeno. Gli animali che lo assumono dall'acqua (ad es. Protozoi, Nematodi e Rotiferi) appartengono all'hydrobios, quelli che lo assumono dall'aria (Acari, Collemboli, Gastropodi, ecc.) costituiscono l'atmobios. Una sostanza inquinante può essere poco o molto solubile in acqua: diverso sarà conseguentemente il suo effetto sui due gruppi.

La coltivazione dei campi modifica l'ambiente agendo direttamente sulla pedofauna con l'aratura, il tipo di coltura ed eventuali rotazione, la raccolta dei prodotti agricoli, la concimazione e l'irrigazione. A questi fattori antropici si aggiungono gli eventuali trattamenti con insetticidi, erbicidi, fungicidi e fumiganti (13-14).

Nei suoli non coltivati il popolamento edafico è più abbondante di quelli sottoposti a pratiche agricole. Sono presenti ordini prettamente edafici quali i Collemboli, presenti sempre con l'eccezione dei periodi siccitosi. Durante questi ultimi possono rimanere gli Acari anche se in limitate quantità (poche unità/m<sup>2</sup>).

Gli animali che nei terreni incolti di norma popolano essenzialmente gli strati più superficiali con l'aratura sono in grado di raggiungere profondità assai maggiori. Il fenomeno assume particolare importanza quando viene utilizzato un pesticida (quale anche l'atrazina) a distribuzione superficiale. In tal caso gli animali in grado di penetrare negli anfratti del terreno possono evitare l'azione dell'inquinante raggiungendo strati più profondi. Non tutti gli animali del suolo risentono direttamente di erbicidi e più in generale di pesticidi: tuttavia anche se non si verificano tali azioni dirette, si possono ugualmente riscontrare variazioni nella densità di popolamento animale. Questi fenomeni si spiegano con una azione degli erbicidi su altri componenti della catena alimentare che portano ad aumento o diminuzione di cibo (costituito sia da organismi vegetali che animali, sia da sostanze in decomposizione) e variano i rapporti di equilibrio tra predatore e preda. Ad una iniziale flessione del numero di individui segue in genere un recupero e la popolazione così ricostruita è "selezionata" e resiste, senza apprezzabili perdite, ai successivi trattamenti.

Allo scopo di valutare gli effetti dei trattamenti antiparassitari (insetticidi, fosfororganici e fungicidi) in agricoltura sulla fauna del suolo correnti ricerche hanno rivolto l'attenzione all'ecosistema artificiale "PIOPPE" perchè si tratta di una coltivazione pluriennale stabile per circa 10 anni e non soggetta ad altre pratiche agronomiche che il trattamento antiparassitario e il diserbo. La scelta della pedofauna quale motivazione biologica è stata dettata dalla scarsa modalità orizzontale della maggior parte degli organismi del suolo che,

con le dovute eccezioni rimangono nell'area del "PIOPPETO" durante il loro ciclo vitale, registrando tutti gli effetti dei trattamenti.

Il 97,8% degli esemplari identificati appartengono al Phylum Arthropoda ed il restante 2,2% è costituito da Anellidi e Molluschi. Nel complesso si è osservato che i trattamenti parassitari mediante esteri fosforici producono 2 tipi di alterazioni a carico di Acari e Collemboli:

1) dopo il trattamento si osserva in tutti i casi esaminati una riduzione numerica di entrambi i gruppi all'interno dell'area trattata.

Si può quindi affermare che su questi taxa animali c'è un effetto tossico diretto anche se non drastico.

2) sussiste un effetto indiretto che porta all'alterazione dei cicli stagionali, evidenziato dalla presenza di picchi di popolazione anormali o manifestatisi in tempi diversi rispetto al campione di controllo.

Si può inoltre osservare che le abbondanze di Acari e Collemboli sono assai basse nelle aree trattate e si rileva una maggiore sensibilità dei Collemboli quali indicatori biologici.

### 9. Le specie vegetali come indicatori ambientali

Le specie vegetali, per il loro quasi universale carattere di fissità al suolo, non possono sfuggire all'influenza del substrato se non in misura assai limitata e pertanto sono ancor più degli organismi animali, adatte e adattate a svolgere il ruolo di **indicatori ambientali** (15):

Phragmites australis e Arundo Donax indicano la presenza di acqua più o meno superficiale nel substrato;

Salicornia Harbecca, Arthocunum glaucum e Halocnemum strobilaceum indicano elevate concentrazioni di sali nel suolo.

In presenza di metalli pesanti le specie vegetali si comportano diversamente a seconda delle loro caratteristiche fisiologiche: possono scomparire dall'area interessata, oppure possono permanervi divenendo invadenti ed accumulando notevoli quantità di sostanze inquinanti.

I primi, grazie alla loro sensibilità ai inquinanti possono essere utilizzate come economici

test-allarme in grado anche di dare precise indicazioni sugli effetti biologici causati dalle nuove sostanze introdotte nell'ecosistema.

Nel secondo caso, le specie vegetali possono essere utilizzate nei test di accumulo. Tra le piante accumulatrici di metalli pesanti diffusi nel suolo si ricordano:

- *Viola calaminaria* (Zn)
- *Armenia maritima* (Cu)
- *Gypsophila patrinii* (Cu)
- *Silena cobalticola* (Co)
- *Crotalaria cobalticola* (Cu)
- *Silene otites* (Cu)
- *Alsina verna* (Cu, Pb, Ag, Zn)
- *Alyssum bertolonii* (Ni)
- *Alyssum murale* (Ni)
- *Lonicera confusa* (Ag)
- *Silene vulgaris* (Zn)
- *Arabis Halleri* (Zn)
- *Anafallis collina* (Zn)
- *Cistus monspeliensis* (Zn)

Perchè si abbiano sempre risposte costanti da parte delle specie utilizzate come biotest è indispensabile che queste siano geneticamente omogenee e la loro provenienza sia sempre costante.

La ricerca in laboratorio, per individuare le specie utilizzabili come biotest a breve e a medio termine ha portato al risultato che le risposte più pronte ed immediate si ottengono quando vengono utilizzate piante ai primissimi stadi di sviluppo come semi in fase di germinazione e plantule nei primi giorni di età.

## Conclusioni

Inquinamenti di varia natura raggiungono il suolo attraverso vie diverse ma il loro destino puo' essere controllato dal suolo stesso attraverso processi di natura chimica, fisica e biologica.

L' approfondimento di tali meccanismi, insieme allo studio degli effetti, talora devastanti, delle sostanze inquinanti, ha gia' permesso di individuare utili indicatori disinquinamento, soprattutto nel campo biologico, in una ottica generale di prevenzione e di risanamento, a cui da tempo il mondo scientifico e' sensibilizzato. I controlli biologici sono da preferire a quelli chimici in quanto in grado di fornire valutazioni sullo stato globale dell'ambiente all'atto dell'esame e soprattutto su quello passato. I bioindicatori possono essere usati in campo direttamente nella zona ambientale in esame ( ad es. i bioindicatori di accumulo ), oppure nella sperimentazione di laboratorio al fine di valutare generalmente l'attivita' tossica di composti puri. Lo studio dei microecosistemi, un compromesso tra la ricerca di laboratorio e l'osservazione in natura, contribuisce invece a far conoscere gli effetti sinergici di piu' composti chimici presenti nell'ambiente. Come parametri dell'attivita' biologica vengono presi di solito in considerazione:

- la carica microbica totale ed i principali gruppi fisiologici del terreno (schizomiceti eterotrofi aerobi, azotofissatori aerobi ed anaerobi, ammonificanti, cellulolitici aerobi ed anaerobi)
- l'attivita' respiratoria
- l'attivita' di nitrificazione (assai sensibile soprattutto a livello rizosferico tanto da essere considerata tra i migliori indicatori di inquinamento del suolo)
- l'attivita' di alcuni enzimi (la deidrogenasi, l'ureasi e la fosfatasi)

Tuttavia, gli indici di attivita' microbiologica globale, generalmente impiegati per rilevare gli effetti degli inquinanti nel suolo, possono talvolta risultare non specifici; inoltre, alcuni enzimi, cosiddetti abiontici del suolo, non sono influenzati da certe sostanze chimiche inquinanti come ad es. gli erbicidi. Per ovviare a questi inconvenienti sono stati

recentemente individuati, nel campo dell'ecologia microbica del suolo, nuovi metodi di valutazione del grado di inquinamento raggiunto. Essi si basano sullo studio delle modificazioni della composizione della microflora fotosintetica (popolazione algale e cianobatterica) e su alcune funzioni rizosferiche quali l'azotofissazione associativa e la produzione di etilene

Lo stato di alterazione dell'ambiente puo' essere efficacemente descritto mediante l'utilizzo di bioindicatori o meglio di indicatori ecologici quali gli invertebrati per la loro sensibilita' e per l'elevato grado di speciazione.

A questo scopo particolare importanza assumono, tra i microartropodi, le popolazioni di Acari e Collemboli.

Ancora piu' degli organismi animali, le specie vegetali risentono dell'influenza dei inquinanti ambientali ed e' proprio ad una rete strategica di controlli a breve, a medio e a lungo termine, basata sull'uso di organismi vegetali che si guarda ormai da tempo per un controllo capillare delle aree territoriali inquinate. La necessita' e' anche quella di sensibilizzare l'opinione pubblica , gli amministratori locali e i legislatori sull'utilita' e la validita' di tali metodi di monitoraggio , al fine di raggiungere un punto di intesa fondamentale perche' gli sforzi di chi lavora per la salvaguardia dell'ambiente non perdano consistenza.

## BIBLIOGRAFIA

- 1) ZAVATTIERO E. (1988) - Istituto Superiore di Sanità - Rapporto ISTISAN " Il suolo inquinamento e protezione ", pp.88/45
- 2) PELCZAR M.J., REID R.D., CHAN E.C.S. - " Microbiologia del suolo " - Microbiologia - vol. 2, Zanichelli (Bo), pp.701-723
- 3) SEQUI P. (1983) - " Inquinamento del terreno " - Collana Progetto Finalizzato CNR : Promozione della qualità dell'ambiente - p. 118
- 4) SEQUI P., PARDINI G., CALCINAI M.(1982) " Influenza su alcune proprietà chimiche del terreno della somministrazione di effluenti di allevamenti intensivi zootecnici " - Collana Progetto Finalizzato del CNR - AC/4/130, pp. 169 - 174
- 5) PAGLIAI M. (1982) - " Influenza della somministrazione di liquami zootecnici sulle caratteristiche fisiche del terreno " - Collana Progetto Finalizzato del CNR - AC/4/125, pp. 67 - 79
- 6) L.GOLDBERG FEDERICO, FERRARI A. (1982) - " Influenza della somministrazione di liquami zootecnici sulle proprietà biologiche del terreno " - Collana Progetto Finalizzato del CNR - AC/4/126, pp. 81 - 99
- 7) VOLTERRA L., DI GIROLAMO I. (1990) - Istituto Superiore di Sanità - Rapporto ISTISAN " Riutilizzo agricolo dei reflui di depurazione : aspetti igienico-sanitari", 90/1, pp.58
- 8) FIORILLO S., ROCCIA A., MANCINI L., VOLTERRA L., VISMARA R. (1992) " Rilevamento di uova di elminti in reflui fognari : comparazione delle metodologie " - Ingegneria Ambientale, 21 (7-8)
- 9) SEQUI P.(1981) " Inquinamento del terreno da atrazina un esempio di ricerca coordinata" - Collana Progetto Finalizzato del CNR - AC/4/69, pp.75 - 113
- 10) KHAN S.U. (1980) " Pesticides in the soil environment " - Fundamental aspects of pollution control and environmental science, Wakeman (Amsterdam-Oxford-New York), pp. 235

- 11) CAVAZZA L. (1982) " Aspetti fisici della mobilita' degli erbicidi nel terreno con particolare riguardo all'atrazina " - Collana Progetto Finalizzato del CNR - AC/4/167, pp.21 - 30
- 12) RAVERA O. (1982) " Necessita' e limiti degli indici e degli indicatori biologici " - Collana Progetto Finalizzato del CNR - AC/1/130, pp.11 - 19
- 13) BERTOLANI R., SABATINI M.A., FRATELLO B. (1981) "Metodi per la rilevazione degli effetti dell'atrazina ed altri erbicidi sulla pedofauna " - Collana Progetto Finalizzato del CNR - AQ/4/9, pp. 155 - 176
- 14) BERTOLANI R., SABATINI M.A., FRATELLO B. (1981) - " Il popolamento dei microartropodi in terreni trattati con atrazina " - Collana Progetto Finalizzato del CNR - AC 4/70, pp. 81 - 93
- 15) ONNIS A. (1982) - " Le specie vegetali come indicatori ambientali " - Collana Progetto Finalizzato del CNR -AC/1/136, pp. 89 - 99

*Direttore dell'Istituto Superiore di Sanità  
e Responsabile scientifico: Francesco Antonio Manzoli*

*Direttore responsabile: Vilma Alberani*

*Stampato dal Servizio per le attività editoriali  
dell'Istituto Superiore di Sanità, Viale Regina Elena, 299 - 00161 ROMA*

*La riproduzione parziale o totale dei Rapporti e Congressi ISTISAN  
deve essere preventivamente autorizzata.*

*Reg. Stampa - Tribunale di Roma n. 131/88 del 1° marzo 1988*

*Roma, giugno 1993 (n. 2) 9° Suppl.*

*La responsabilità dei dati scientifici e tecnici  
pubblicati nei Rapporti e Congressi ISTISAN è dei singoli autori*