



Tossicologia degli inquinanti ambientali

Prof Claudia Cristiano
claudia.cristiano@unina.it

Bioindicazione e monitoraggio ambientale

Negli ultimi anni è cresciuto l'interesse per l'uso dei bioindicatori ai fini dello studio e della valutazione dell'inquinamento atmosferico, idrico o edafico e per la definizione della "qualità" ambientale; infatti tra i compiti istituzionali dell'ISPRA (ex APAT), vi è quello della promozione e messa a punto di metodologie per la definizione della qualità ecosistemica e il biomonitoraggio.

Valutazione e interpretazione della risposta di un bioindicatore ad un parametro ambientale rientra nelle procedure di biovalutazione (**BIOINDICAZIONE**).

Quando le biovalutazioni vengono effettuate secondo procedure protratte nel tempo, con metodiche ben definite e con precisi scopi di analisi dello stato ambientale, si parla di **BIOMONITORAGGIO**.

Fasi del biomonitoraggio ambientale

Il termine “**biomonitoraggio**” è stato introdotto dalla **Medicina del lavoro** per definire la misura diretta di elementi, composti chimici tossici o loro metaboliti nel corpo umano, ad esempio in fluidi corporei come il sangue, le urine, la saliva, il liquido spermatico, i capelli o il latte.

Nella valutazione del rischio sanitario questo approccio permette di conoscere i reali livelli di sostanze cui il singolo soggetto è potenzialmente esposto, migliorando significativamente la ricerca epidemiologica.

Ha fatto scuola il *Center for Disease Control and Prevention* (CDC) degli U.S.A., che pubblica un report biennale “*on Human Exposure to Environmental Chemicals*”, basato su un campione statisticamente rappresentativo della popolazione di quel Paese, in base ad un programma iniziato nel 1976 **su piombo e alcuni pesticidi**.

Ora il termine biomonitoraggio ha una accezione più ampia. Esso indica l'insieme delle metodologie che utilizzano comunità di organismi, singole specie o loro processi metabolici che sono reattivi nei confronti degli inquinanti, per trarre informazioni sullo stato dell'ambiente, in particolare per stimare possibili deviazioni da valori «normali» o di background.

Fasi del biomonitoraggio ambientale

- definizione dell'obiettivo dell'attività di biomonitoraggio.
- selezione dei bioindicatori e del tipo di segnale-risposta che si vuol cogliere in relazione agli obiettivi prefissati; definizione di una scala di valori di riferimento.
- selezione di una metodologia idonea, fattibile, standardizzata che segua precisi protocolli di rilevamento.
- organizzazione di una rete territoriale di biomonitoraggio; i bioindicatori selezionati devono essere distribuiti in modo tale da cogliere tutte le possibili sfumature del fenomeno da indagare ma, nel contempo, ridurre a un numero minimo significativo le stazioni da analizzare.
- Individuazione di aree di controllo con buona qualità ecologica.
- Stesura di un piano esecutivo, con definizione dei tempi, numero dei campionamenti e costi. Tale piano deve tener conto dei bioritmi del bioindicatore, della sua velocità di risposta allo «stimolo» e delle sue eventuali fluttuazioni nel tempo.
- Raccolta dei dati e interpretazione degli stessi e valutazione del grado di discostamento rispetto ad una condizione di riferimento.
- Valutazioni finali e formulazione di proposte operative se necessarie.

Biomonitoraggio ambientale

In relazione alle modalità operative, si distinguono due tipi di monitoraggio:

- Biomonitoraggio DIRETTO (ATTIVO)
- Biomonitoraggio INDIRETTO (PASSIVO)

Biomonitoraggio DIRETTO (ATTIVO)

Utilizzo di organismi selezionati e posti artificialmente nell'ambiente da monitorare. I "biomonitors" vengono introdotti deliberatamente nel territorio da esaminare (sono quindi «**alloctoni**»)

Metodologia di biomonitoraggio diretto comprende:

- **Test di tossicità (o di allarme):** test utili per analisi rapidi. Uso di appositi contenitori contenenti l'organismo test, in cui si fa defluire l'acqua da monitorare; controllo del tipo di risposta (mortalità, alterazioni morfologiche, alterazioni fisiologiche..) dell'organismo a intervalli di tempo determinati.
- **Test di bioaccumulo:** uso di organismi bioaccumulatori, in cui è possibile quantificare l'informazione attraverso procedure di spettro o gascromatografia (licheni, briofite, bivalvi...).

Il biomonitoraggio diretto utilizza materiale biologico, ma le misurazioni sono in genere di tipo quantitativo, facendo uso di strumentazione specifica

Biomonitoraggio **INDIRETTO (PASSIVO)**

Utilizzo di organismi naturalmente già presenti nell'ambiente da monitorare
(sono quindi «**autoctoni**»)

Metodologia di biomonitoraggio basata sull'assunto che ogni cambiamento nell'ambiente influenza la vita degli organismi presenti; l'osservazione e lo studio in natura di specie o comunità vegetali/animali è sufficiente per monitorare lo stato dell'ecosistema.

In genere parametri biologici, quali biodiversità, copertura, equitabilità e caratteristiche strutturali sono correlati a determinati fattori ambientali uso di indici biologici.

Questo tipo di biomonitoraggio richiede tempi generalmente più lunghi del biomonitoraggio diretto e fornisce risposte soprattutto di tipo quali-quantitativo sullo stato ambientale ma permette di valutare la capacità di omeostasi dell'ecosistema e gli effetti cronici a lungo termine di stressori.

E' considerato il **VERO BIOMONITORAGGIO** perché utilizza criteri esclusivamente biologici per stimare la qualità ambientale.

Biomonitoraggio e misure strumentali

VANTAGGI della bioindicazione e biomonitoraggio rispetto alle indagini strumentali:

1. Maggiore economicità del metodo;
2. Registra fenomeni di sinergia fra diversi fattori ambientali;
3. memoria storica e spaziale dei fenomeni in un dato ecosistema. Bioindicatori come “naturali permanenti”, mentre analisi chimico-fisiche forniscono risultati puntiformi relativi esclusivamente al luogo e all’istante del campionamento.
4. Individuazione di perturbazioni precoci ed intermittenti; bioindicatori assumono il ruolo di “organismi sentinella”.
5. Documentazione degli effetti reali delle alterazioni ambientali sulle comunità biotiche, mentre le analisi strumentali forniscono una misura del possibile rischio presente nell’ambiente.
6. Registrazione di effetti sulle biocenosi anche di “inquinanti” sconosciuti, non misurabili con strumenti chimico-fisici che rilevano solo sostanze per cui sono stati progettati.
7. Valutazione di parametri non misurabili strumentalmente: complessità biologica, valore ecologico, stato qualitativo e dinamismo delle trasformazioni cenologiche.
8. Redazione di carte tematiche, con tempi e costi minori, utili per confrontare nello spazio e/o nel tempo variazioni di parametri ambientali.

Biomonitoraggio e misure strumentali

SVANTAGGI della bioindicazione e biomonitoraggio rispetto alle indagini strumentali:

1. Stime indirette, spesso non selettive, mentre gli strumenti misurano singoli fattori.
2. Valutazioni meno precise ed oggettive delle misure strumentali.
3. Misure che spesso sono il risultato di una attività stagionale, mentre lo strumento può funzionare tutto l'anno.
4. Il dato biologico, anche se confrontabile con altre situazioni, non è sempre formalizzato da tabelle di riferimento.
5. La raccolta del dato biologico richiede personale tecnico con preparazione più specifica, rispetto a quella richiesta per la lettura del dato strumentale.
6. Possibili fenomeni di adattamento alla perturbazione che si sta indagando, falsando il risultato della biovalutazione; gli strumenti di misura se mantenuti efficienti, non subiscono nel tempo variazioni nelle prestazioni.

Definizioni

Le sostanze che si degradano lentamente nell'ambiente sono denominate «**persistenti**». Le sostanze che tendono a insediarsi nel materiale biologico, e i cui livelli tendono ad aumentare con l'esposizione ripetuta, sono definite «**bioaccumulabili**». Le sostanze che possono nuocere agli organismi in seguito al contatto sono chiamate «**tossiche**».

Nel valutare se una sostanza è persistente, bioaccumulabile o tossica, si può giungere a 3 conclusioni:

- 1. Una sostanza è persistente e bioaccumulabile e tossica (PBT)**
- 2. Una sostanza è molto persistente e molto bioaccumulabile (vPvB)**
- 3. Una sostanza non è PBT, né vPvB.**

E' obbligatorio valutare se una sostanza è di tipo PBT o vPvB dato che queste possono raggiungere anche aree remote nell'ambiente finanche dopo molto tempo. Tendono ad accumularsi negli organismi e raggiungere gli essere umani attraverso la catena alimentare. Ciò può comportare conseguenze imprevedibili nel lungo termine, senza contare il fatto che è difficile invertire l'accumulazione una volta avvenuta.

PARAMETRI

Fattore di bioaccumulo (BAF): si intende il rapporto tra la concentrazione nell'organismo e la concentrazione nel comparto.

Bioconcentrazione: si intende l'accumulo netto di contaminanti solo dalla sorgente acqua.

Biomagnificazione: si intende l'aumento della concentrazione del contaminante nell'organismo da un livello trofico al successivo dovuto all'accumulo di cibo.

Si definisce BAF il rapporto tra la concentrazione della sostanza chimica nell'organismo e la concentrazione nell'ambiente esterno.

Il bioaccumulo delle sostanze inquinanti può avvenire direttamente dall'ambiente in cui l'organismo vive, attraverso le superfici respiratorie e/o la pelle, oppure attraverso l'ingestione di altri organismi viventi lungo le catene alimentari, o anche in entrambi i modi: nel primo caso il fenomeno viene definito **bioconcentrazione**, nel secondo caso **biomagnificazione**.

Bioaccumulo

Nella valutazione del rischio delle sostanze chimiche sugli organismi diviene importante stimare la quantità del contaminante bioaccumulato nell'organismo.

Il termine " bioaccumulo " indica il processo per cui una sostanza chimica viene accumulata nei tessuti di un organismo attraverso tutte le possibili vie di assorbimento ed è quantificato dal **fattore di bioaccumulo (BAF)**.

Si definisce BAF il rapporto tra la concentrazione della sostanza chimica nell'organismo e la concentrazione nell'ambiente esterno.

Il bioaccumulo delle sostanze inquinanti può avvenire direttamente dall'ambiente in cui l'organismo vive, attraverso le superfici respiratorie e/o la pelle, oppure attraverso l'ingestione di altri organismi viventi lungo le catene alimentari, o anche in entrambi i modi: nel primo caso il fenomeno viene definito **bioconcentrazione**, nel secondo caso **biomagnificazione**.

Bioaccumulatore

Il termine di bioaccumulatore si impiega quando le concentrazioni di determinate sostanze inquinanti all'interno di un organismo sono utilizzate per la ricostruzione dei patterns di deposizione nell'ambiente in cui l'organismo vive.

I Bioaccumulatori sono, quindi, organismi in grado di sopravvivere alla presenza di un contaminante assimilato dalle matrici ambientali (acqua, suolo), accumulandolo e permettendone una qualificazione e una quantificazione.

Un buon bioaccumulatore deve possedere i requisiti di seguito:

- alta tolleranza agli inquinanti che sono oggetto della sperimentazione
- capacità di accumulare indefinitamente
- ampia distribuzione nell'area di studio
- scarsa mobilità
- lungo ciclo vitale.

Bioaccumulo

Il bioaccumulo dipende da:

❑ Forma di inquinante:

influisce molto sulla biodisponibilità dello stesso.

- Ad esempio la forma NH_3 in acqua è più biologicamente disponibile di quella ionica NH_4^+ .
- La forma ionica degli ioni metallici risulta più disponibile e tossica.
- Per composti organici maggiore è K_{OW} (coefficiente di ripartizione n-ottanolo/acqua) maggiore ad esempio è la concentrazione del contaminante nell'organismo.

❑ Caratteristiche dell'organismo:

Tipo di bioaccumulatore, caratteristiche strutturali, tipo di dieta, età, sesso.

❑ Condizioni ambientali:

temperatura, pH, pressione

Parametri del bioaccumulo

LA MODELLIZZAZIONE del processo di bioaccumulo è molto complessa perché tiene conto di diversi fenomeni:

Uptake

è il fenomeno che indica il movimento del contaminante all'interno dell'organismo e può interessare le branchie, l'intestino, l'epidermide la superficie polmonare, le radici, le foglie etc.

Biotrasformazione

all'interno dell'organismo la sostanza chimica può essere trasformata.

Eliminazione

è l'escrezione del contaminante dall'organismo. I processi di eliminazione variano molto tra piante, invertebrati, vertebrati e a seconda della sostanza.

La biotrasformazione e l'eliminazione sono due processi che indicano un abbassamento della concentrazione di contaminante all'interno dell'organismo.

Parametri del bioaccumulo

La variazione nel tempo della concentrazione del contaminante all'interno dell'organismo è data dalla seguente relazione:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = k_U C_1 - k_E C$$

- **C1** è la concentrazione nella sorgente ad esempio l'acqua;
- **C** la concentrazione nel compartimento, ad esempio il pesce;
- **KU** è il coefficiente di uptake;
- **kE** è il coefficiente di eliminazione.

Bioaccumulatore

Gli organismi bioaccumulatori sono attualmente utilizzati in molte reti di sorveglianza allestite sul territorio europeo, come nel caso del progetto GEMS (Global Environment Monitoring System), nel quale sono utilizzate le proprietà accumulatrici di **muschi e licheni** per quanto riguarda i metalli pesanti.

Altri organismi bioaccumulatori, quali i **mitilli**, sono impiegati nei programmi di monitoraggio della qualità delle acque marine costiere, stante la loro capacità di accumulare al loro interno metalli pesanti, sostanze organiche e microrganismi patogeni.

Anche insetti quali le **api** possono essere considerate dei bioaccumulatori e sono impiegate nella valutazione del fall out di metalli pesanti, fitofarmaci e sostanze radioattive.

Bioconcentrazione

Il **fattore di bioconcentrazione (BCF)** è utilizzato tipicamente per gli organismi **acquatici** con riferimento all'assorbimento dell'inquinante dall'acqua, mentre il **fattore di biomagnificazione (BMF)** è definito come il rapporto tra la concentrazione di una sostanza nel predatore e la concentrazione presente nella sua preda.

Con questo parametro si studia la tendenza del contaminante chimico ad essere accumulato in un organismo vivente a livelli maggiori di quelli presenti nell'ambiente in cui vive.

Sostanze che presentano un BCF maggiore di 100 sono classificate **bioaccumulative**. **Elevati fattori di bioaccumulo** sono responsabili del fenomeno di **«amplificazione»** delle concentrazioni, che portano quantità e concentrazioni di inquinanti presenti nell'ambiente da livelli di traccia a livelli potenzialmente pericolosi.

Co è la concentrazione della sostanza nell'organismo (mg/kg, p/p).

Cw indica la concentrazione della sostanza tossica nell'acqua (mg/L, p/V).

$$\mathbf{BCF = Co/Cw \ [L/Kg]}$$

Biomagnificazione

La biomagnificazione, o bioamplificazione, è il processo per cui l'accumulo di sostanze tossiche negli esseri viventi aumenta di concentrazione man mano che si sale al livello trofico successivo, ovvero procedendo dal basso verso l'alto della piramide alimentare all'interno della rete trofica.

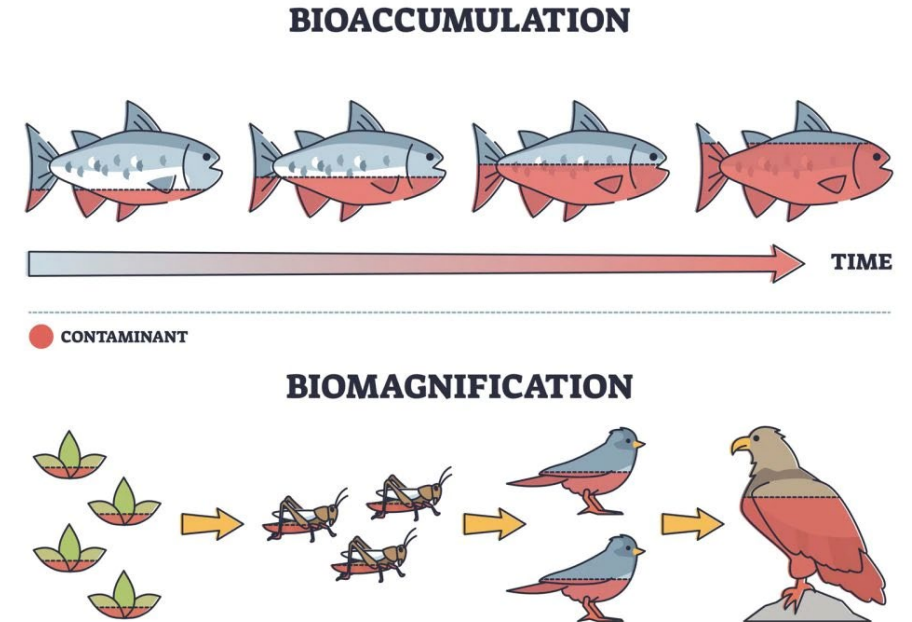
Un modo semplice per quantificare la biomagnificazione è dividere la concentrazione del contaminante ad un livello trofico n (C_n) con il livello trofico immediatamente più basso (C_{n-1}).

$$B = C_n / C_{n-1}$$

Biomagnificazione

ESEMPIO:

- ❑ Un microorganismo di fitoplancton ingloba in sé 1 atomo di mercurio;
- ❑ Un organismo di zooplancton mangia poi 10 organismi di fitoplancton e ingloba di conseguenza 10 atomi di mercurio;
- ❑ Un piccolo pesce mangia 500 organismi di zooplancton e ingloba quindi 5 000 atomi di mercurio;
- ❑ Un pesce di media taglia mangia 5 pesci di piccola taglia e ingloba 25 000 atomi di mercurio;
- ❑ Un pesce di grossa taglia mangia 2 pesci di media taglia e siamo a 50 000 atomi;
- ❑ Infine uno squalo mangia 5 pesci di grossa taglia e ingloba quindi 250 000 atomi di mercurio.



Persistenza & resistenza

Le sostanze subiscono fenomeni di trasformazione in seguito a processi di degradazione di natura chimica fisica e biologica.

Persistenza:

Intesa come residenza, è il tempo di permanenza di un inquinante in un determinato comparto qualunque sia la via con cui questo viene rimosso (degradazione, trasporto di massa, assorbimento). La persistenza di una sostanza riflette:

- La potenzialità di un'esposizione a lungo termine degli organismi alla sostanza
- La potenzialità di una sostanza di raggiungere l'ambiente marino e di essere trasportato in aree remote.

Resistenza alla degradazione:

Capacità di una sostanza di rimanere in forma inalterata nell'ambiente.

E' rappresentata dal tempo di dimezzamento(*half-life*) il quale è riferito ai vari comparti ambientali.

Le sostanze persistenti bioaccumulabili e tossiche (PBT)

Il Regolamento REACH acronimo di Registration, Evaluation, Authorisation and restriction of Chemicals) ha fra i suoi obiettivi quello di incoraggiare la graduale sostituzione delle sostanze estremamente preoccupanti con sostanze (o tecnologie) meno pericolose.

Tra le sostanze “estremamente preoccupanti”, oltre a quelle classificate come Cancerogene, Mutagene e tossiche per la Riproduzione (CMR) e a quelle identificate come Interferenti Endocrini (IE), figurano le sostanze Persistenti, Bioaccumulabili e Tossiche (PBT) e molto Persistenti e molto Bioaccumulabili (vPvB).

L'utilizzo di queste sostanze rappresenta un pericolo per l'ambiente e la salute umana. Per queste sostanze non può essere individuata con sufficiente affidabilità una concentrazione nell'ambiente al di sotto della quale i rischi possono essere controllati e considerati trascurabili.

Le sostanze persistenti bioaccumulabili e tossiche (PBT)

Pertanto le misure di precauzione previste dal regolamento REACH sono adottate sulla base delle loro caratteristiche di pericolo (proprietà intrinseche), a prescindere dalle prevedibili concentrazioni nell'ambiente.

Per essere identificate come **PBT** le sostanze devono presentare le seguenti caratteristiche:

Persistenza (P): indica che la sostanza è in grado di resistere ai processi di degradazione, restando inalterata per lunghi periodi di tempo in uno o più comparti ambientali (es.: acqua, suolo, aria, sedimenti);

Bioaccumulo (B): indica che la sostanza ha la tendenza ad accumularsi negli organismi viventi e questa tendenza può riguardare ecosistemi che si trovano a grande distanza dalla fonte di rilascio della sostanza stessa;

Tossicità (T): per gli organismi biologici (uomo e biota): è identificata generalmente attraverso studi specifici che permettono di determinare le dosi a cui si manifestano effetti nocivi a carico degli organismi "bersaglio".

Criteri vP e vB

- Nel caso di sostanze “molto Persistenti” e “molto Bioaccumulabili” (vPvB), che possono determinare effetti nocivi in tempi molto più lunghi rispetto ai periodi previsti dai protocolli sperimentali, la tossicità (T) non viene presa in considerazione per identificare il livello di pericolo;
- Una sostanza vPvB è ritenuta “estremamente preoccupante” per le possibili conseguenze sull’ambiente, indipendentemente dalla sua tossicità per l’uomo e per gli organismi animali.
- Le sostanze PBT e vPvB sono identificate come tali in base ai criteri previsti nell’allegato XIII del regolamento REACH.
- Una sostanza è bioaccumulabile (B) se il suo fattore di bioconcentrazione (BCF) nelle specie acquatiche è superiore a 2000, è invece molto bioaccumulabile (vB) se BCF è superiore a 5000.

Elenco delle sostanze identificate come PBT o vPvB incluse nella Candidate List

	Nome della sostanza	Ragione di inclusione nella candidate list	Usi
1	2-(2H-benzotriazol-2-yl)-4-(tert-butyl)-6-(sec-butyl)phenol (UV-350)	vPvB e CMR	Filtri uv
2	2-(2H-benzotriazol-2-yl)-4,6-ditertpentylphenol (UV-328)	PBT e vPvB	Filtri uv
3	2,4-di-tert-butyl-6-(5-chlorobenzotriazol-2-yl)phenol (UV-327)	vPvB	Filtri uv
4	2-benzotriazol-2-yl-4,6-di-tert-butylphenol (UV-320)	PBT e vPvB	Filtri uv
5	5-sec-butyl-2-(2,4-dimethylcyclohex-3-en-1-yl)-5-methyl-1,3-dioxane [1], 5-sec-butyl-2-(4,6-dimethylcyclohex-3-en-1-yl)-5-methyl-1,3-dioxane [2]	vPvB	Fragranza nella produzione di detergenti, shampoo ecc.
6	5-tert-butyl-2,4,6-trinitro-m-xylene (Musk xylene)*	vPvB	Ingrediente di prodotti profumati, cosmetici, saponi ecc.
7	Alkanes, C10-13, chloro (Short Chain Chlorinated Paraffins)	PBT e vPvB	Plasticanti e ritardanti di fiamma ecc.
8	Ammonium pentadecafluorooctanoate (APFO)	PBT e R	Intermedio nella produzione di altre sostanze
9	Anthracene	PBT	Intermedio nella produzione di altre sostanze
10	Anthracene oil	PBT e vPvB e C	Fabbricazione di cemento, metalli ecc.
11	Anthracene oil, anthracene paste	PBT e vPvB CM	Intermedio nella produzione di altre sostanze
12	Anthracene oil, anthracene paste, anthracene fraction	PBT e vPvB e CM	Intermedio nella produzione di altre sostanze
13	Anthracene oil, anthracene paste, distn. lights	PBT e vPvB e CM	Intermedio nella produzione di altre sostanze
14	Anthracene oil, anthracene-low	PBT e vPvB e CM	Intermedio nella produzione di altre sostanze
15	Benzo(def)chrysene	PBT e vPvB	Generalmente non è prodotta intenzionalmente ma si trova come impurezza o costituente di altre sostanze
16	Bis(pentabromophenyl) ether (decabromodiphenyl ether) (DecaBDE)	PBT e vPvB	Ritardante di fiamma

	Nome della sostanza	Ragione di inclusione nella candidate list	Usi
17	Bis(tributyltin) oxide (TBTO)	PBT	Intermedio nella produzione di altre sostanze
18	Henicosaflluoroundecanoic acid	vPvB	Intermedio nelle produzioni plastiche
19	Heptacosaflluorotetradecanoic acid	vPvB	Intermedio nella produzione di altre sostanze
20	Hexabromocyclododecane (HBCDD)*	PBT	Ritardante di fiamma
21	Pentacosaflluorotridecanoic acid	vPvB	Utilizzato industrialmente nella produzione di fluoro polimeri, ecc
22	Pentadecafluorooctanoic acid (PFOA)	PBT e R	Utilizzato in processi industriali, come rivestimento impermeabilizzante per tessuti, pellame ecc.
23	Perfluorononan-1-oic-acid and its sodium and ammonium salts	PBT e R	Utilizzato industrialmente nella polimerizzazione per la produzione di fluoro polimeri, ecc.
24	Pitch, coal tar, high-temp.	PBT e vPvB e C	Formulazione di miscele, fabbricazione di metalli e altri prodotti chimici ad esempio cemento. Può trovarsi in prodotti costituiti da materiali a base di plastica (ad esempio imballaggi per alimenti, giocattoli, telefoni cellulari).
25	Tricosaflluorododecanoic acid	vPvB	Utilizzato industrialmente nella produzione di fluoro polimeri, ecc

Fonte - Elaborazione Ministero Ambiente su dati ECHA, 2016

* già soggetta all'obbligo di autorizzazione REACH

C: Cancerogena

M: Mutagena

R: Tossica per la riproduzione

PBT: Persistente, Bioaccumulabile, Tossica

vPvB: molto Persistente, molto Bioaccumulabile

Indicatore Biologico

Con il termine indicatore biologico (o bioindicatore o specie indicatrice) si intende una specie animale, pianta o fungo particolarmente sensibile a cambiamenti apportati da fattori inquinanti all'ecosistema.

Secondo Iserentant & De Sloover un bioindicatore è un **organismo o un sistema biologico usato per valutare una modificazione** – generalmente degenerativa – **della qualità dell'ambiente.**

Ad esempio un indicatore biologico è utile per riscontrare una situazione di inquinamento sia grazie alla capacità di accumulare sostanze inquinanti (che potranno poi essere rilevate tramite esami di laboratorio) che grazie alle modificazioni morfologiche a cui molti di essi vanno incontro a causa di stress da inquinamento.

Potenzialmente ogni organismo è un indicatore di qualità in quanto, per definizione, il fatto stesso di essere vivo dà delle informazioni sulla presenza di determinate condizioni favorevoli. Fra tutti gli organismi, vi sono molti che hanno una fisiologia ed ecologia ancora sconosciuta e comunque troppo complessa, per i quali è difficile individuare una risposta riconducibile al fenomeno dell'inquinamento piuttosto che ad altre cause.

Indicatori analitici o biologici?

Gli approcci tradizionali alla valutazione dei fenomeni di inquinamento si affidano esclusivamente a **strumentazioni analitiche operanti su base chimica o chimico-fisica**.

Tuttavia l'utilizzo delle centraline di rilevamento, indispensabile nel caso di aree soggette costantemente ad alti tassi di inquinamento atmosferico, come i grandi centri urbani, non può risolvere completamente il problema del monitoraggio dell'inquinamento per diversi motivi:

- limitazione delle misure effettuate con centraline per ovvie ragioni economiche;
- difficoltà nell'utilizzo e nella sintesi dei dati raccolti;
- impossibilità di stimare gli effetti sinergici delle sostanze considerate (come i metalli pesanti).

Esiste pertanto l'esigenza di un **monitoraggio biologico (biomonitoraggio)**, basato appunto sulle variazioni ecologiche indotte dagli inquinanti sull'ambiente in tempi più o meno lunghi, e in concentrazioni medio-basse; queste si riflettono sugli organismi secondo tre modalità principali:

1. accumulo di sostanze inquinanti negli organismi;
2. modificazioni morfo-strutturali degli organismi;
3. variazione della composizione di un dato ambiente o comunità vegetale.

Ciò permette la realizzazione di elaborati cartografici su aree relativamente vaste e in tempi brevi.

Bioindicatore

Praticamente ogni organismo è in grado di dare informazioni sull'ambiente in cui vive, soprattutto se viene confrontato con altri (concetto della “nicchia ecologica” o iper-spazio ecologico), ma soprattutto se viene “interrogato” nella giusta maniera.

Piante, lieviti, insetti, uccelli, lombrichi, molluschi, Sono tutti potenziali “**biomonitors**” ...



Requisiti Bioindicatore

Numerosi sono i requisiti richiesti ad un organismo perché possa essere considerato un buon bioindicatore:

1. Accertata sensibilità agli agenti inquinanti
2. Scarsa mobilità nell'ambito dell'area di indagine
3. Ambia distribuzione in tutto il territorio in esame
4. Ciclo vitale sufficientemente lungo
5. Eventuali capacità di accumulo di sostanze inquinanti

Differenza tra bioaccumulatore e bioindicatore

Si distinguono due tipi diversi di biomonitori:

- ❖ **BIOINDICATORI** hanno elevata sensibilità nei confronti della sostanza (o gruppo di sostanze) inquinante(i), e già in seguito ad esposizioni a basse dosi manifestano sintomi chiari e specifici facilmente quantificabili subendo variazioni evidenti nella fisiologia, nella morfologia o nella distribuzione di frequenza in seguito all'influsso delle sostanze presenti nell'ambiente. Risponde con variazioni identificabili del suo stato a determinati livelli di sostanze inquinanti.
- ❖ **BIOACCUMULATORI** hanno elevata tolleranza e capacità di accumulo, immagazzinando l'inquinante (che deve avere caratteri di persistenza; in alternativa, si devono misurare i suoi derivati stabili), spesso senza evidenziare sintomi; in questo caso, la concentrazione della sostanza misurata nell'organismo dovrebbe riflettere quella ambientale. Può essere usato per misurare qualitativamente e quantitativamente le concentrazioni di una sostanza.

Bioindicatori vegetali

BRIOFITE

Sono organismi diffusi in tutti i continenti e la loro distribuzione dipende sia da fattori generali del clima, come la latitudine e l'altitudine, sia da fattori ecologici come l'umidità, l'illuminazione e l'interazione con gli altri esseri viventi. Ad esempio, l'umidità rappresenta uno dei fattori principali di sopravvivenza delle briofite, anche se la maggior parte di esse può resistere a periodi più o meno prolungati di siccità che può rallentare il loro ciclo vitale. Il ritorno dell'acqua ristabilisce il ritmo normale di vita della piantina.



Bioindicatori vegetali

BRIOFITE

Caratteristiche biologiche che fanno di questi organismi degli ottimi bioindicatori:

- Hanno un' elevata capacità di assorbimento e di accumulo delle sostanze prelevate dall'acqua e dall'atmosfera che si protrae per lungo tempo.
- In condizioni di stress ambientali rallentano le proprie attività metaboliche, per cui aumenta la loro resistenza agli inquinanti. Le basse temperature, per esempio, permettono loro una attività continua anche nel periodo invernale, quando i livelli di inquinamento atmosferico sono più elevati.
- Un'altra caratteristica è la persistenza delle parti vecchie o intossicate per accumulo delle sostanze tossiche, caratteristica che invece non si ritrova nelle piante superiori. Il lento accrescimento e la grande longevità permette di attuare una stima dell'inquinamento su tempi lunghi.
- Sono molto sensibili agli agenti inquinanti quali anidride solforosa, idrocarburi, ozono, piombo, zinco, cadmio ecc.; questa sensibilità si manifesta con alterazioni nell'attività fotosintetica e nella riproduzione sessuale.

Bioindicatori vegetali

BRIOFITE

Possono essere utilizzate per il biomonitoraggio secondo due principali strategie:

- **Come bioaccumulatori:** utilizzando la loro capacità di assorbire sostanze dall'atmosfera e analizzando le concentrazioni di queste nelle piante (approccio diretto).
- **Come bioindicatori:** correlando la ricchezza floristica, l'aspetto esteriore e la copertura alla presenza o assenza di inquinanti (approccio indiretto floristico).

Vengono considerate degli ottimi indicatori biologici in quanto il variare dell'inquinamento dell'aria e dell'acqua non solo **cambia il loro aspetto esteriore, ma variano anche il numero e le specie presenti.**

Le variazioni ecologiche dell'ambiente si riflettono su tali organismi in 3 modi:

- Accumulo di sostanze inquinanti.
- Modificazioni morfo-strutturali (riduzione della vitalità, fertilità della specie e della copertura e del numero totale delle specie nel tempo e nello spazio sono causate per lo più dai metalli pesanti).
- Variazione della composizione floristica della comunità vegetale (l'anidride solforosa è il principale inquinante che interessa su larga scala le briofite. I processi più colpiti sono la fotosintesi e la respirazione).

Bioindicatori vegetali

LICHENI

Si tratta di vegetali insoliti, in quanto espressione della simbiosi tra organismi eterotrofi (funghi, per lo più Ascomiceti, raramente Basidiomiceti) e autotrofi (alghe veri e/o cianobatteri).

Il fungo (micobionte) riceve carboidrati dal suo partner algale (ficobionte) ed in cambio lo rifornisce di acqua e Sali minerali, proteggendolo anche da eccessivo disseccamento e dalle forti radiazioni luminose. L'associazione porta alla formazione di **talli** ben caratterizzati dal punto di vista morfologico e fisiologico e completamente diversi da quelli di partenza.

I talli sono molto semplici dal punto di vista morfologico e strutturale, sono privi di apparato radicale, sono sprovvisti di cuticola, di stomi e di qualsiasi struttura in grado di proteggerli dall'ambiente esterno.



Bioindicatori vegetali

LICHENI

La morfologia dei talli è variabile, ma si possono riconoscere **tre tipi principali di licheni**:

I **CROSTOSI** fortemente aderenti al substrato, privi di cortex inferiore e di rizine, assumono l'aspetto di croste, diverse per forma, colore e dimensioni; irregolarmente circolari, hanno superficie continua, fessurata o composta da areole piane, concave o convesse.

I **FOGLIOSI** presentano lobi piuttosto appiattiti, a struttura dorso-ventrale e di dimensioni variabili; sono generalmente ancorati al substrato per mezzo di rizine e sono, per lo più, facilmente asportabili.

I **FRUTICOSI** aderiscono al substrato solo con la parte basale, hanno lobi tridimensionali a sezione circolare o appiattita e possono essere eretti, penduli o prostrati.

Bioindicatori vegetali

LICHENI

Tra le caratteristiche dei licheni:

- sono estremamente diffusi nell'ambiente e si distribuiscono a tutte le latitudini, sono in grado di conquistare biotopi estremi, adattandosi a vivere in luoghi dove altri vegetali incontrerebbero notevoli difficoltà di sopravvivenza.
- Possono colonizzare qualsiasi tipo di substrato naturale e artificiale: terra, roccia, scorza degli alberi, legno, foglie di piante sempreverdi, ma anche cemento, mattoni, tegole, vetro, amianto ecc.
- I licheni sono longevi, possono essere addirittura plurisecolari, ma hanno crescita molto lenta: in un anno i loro lobi si allungano o il loro tallo aumenta in diametro per valori compresi mediamente tra 1 e 10 mm. I licheni fruticosi crescono più velocemente di quelli fogliosi che, a loro volta, hanno velocità di crescita maggiore dei crostosi.
- assorbono tutte le sostanze presenti nell'atmosfera e le accumulano nel tallo con continuità, senza che vi sia per questi organismi una possibilità di disintossicazione, infatti non possiedono apparato escretore, né ricambio dei tessuti come i vegetali d'alto fusto, che perdono le foglie eliminando con esse una parte delle sostanze tossiche.
- sono particolarmente attivi nei periodi piovosi, nei periodi cioè nei quali è anche più intenso l'inquinamento atmosferico che viene a concentrarsi nelle piogge.

Bioindicatori vegetali

LICHENI

Sono definiti come **bioaccumulatori** perché in grado di evidenziare la presenza di sostanze che per la loro bassa concentrazione sarebbero difficilmente rilevabili con altri metodi.

Il metodo, basato **sull'analisi qualitativa e quantitativa delle sostanze nei talli**, permette di stimare il grado di diffusione degli inquinanti nell'ambiente, individuandone le fonti principali.

I licheni sono utilizzati per indagini su radionuclidi, zolfo, fluoro, idrocarburi clorurati e soprattutto nel biomonitoraggio di metalli in aree urbane e industriali.

La scelta della specie lichenica viene fatta in base alla sua frequenza e distribuzione sul territorio, alla quantità disponibile e alle sue caratteristiche morfologiche; Si preferiscono **talli fogliosi**. Il prelievo viene effettuato sul tronco a più di un metro d'altezza (per ridurre l'influenza delle particelle del suolo) con bisturi di acciaio e il materiale viene inserito in buste di carta. Viene prelevata solo la parte esterna (5-10 mm) di diversi talli (almeno 6-7) presenti su alberi di una stessa località. Le parti centrali dei talli presentano concentrazioni più elevate di metalli rispetto alle parti periferiche più giovani. Analizzando solo queste ultime si considera all'incirca l'ultimo anno di crescita del lichene e, quindi, le sostanze emesse in atmosfera e accumulate nei talli negli ultimi 12 mesi.

Bioindicatori vegetali

LICHENI

Posso essere utilizzati come **bioindicatori**.

Particolarmente utilizzato in Italia è il metodo attuato in Svizzera che si basa sulla frequenza delle specie **licheniche corticicole**.

In questo metodo vengono accuratamente scelti degli alberi su cui effettuare i rilievi, ed è necessario individuare una o due specie arboree abbastanza diffuse nell'area di studio e con caratteristiche simili (pH della scorza il più uniforme possibile, circonferenza > 80 cm, tronchi dritti e senza ferite, non posizionati presso fonti di disturbo ecc.).

Per ogni stazione, il cui numero e localizzazione varia a seconda della zona e del tipo di indagine, viene rilevato un gruppo di alberi contigui, utilizzando un reticolo (30 x 50 cm) suddiviso in 10 rettangoli e posizionato sul tronco nella zona di maggiore copertura lichenica a una altezza mai inferiore a 120 cm. Per ciascun rilievo vengono annotati i licheni reperiti e la loro frequenza, intesa come presenza nei 10 rettangoli del reticolo e, quindi, espressa per ogni specie con valori compresi tra 1 e 10 a cui segue la media aritmetica delle frequenze totali dei rilievi effettuati nella stazione.

Tale metodo ha il vantaggio di essere **poco soggettivo, altamente predittivo** dei tassi di inquinamento, con **costi contenuti**, però non è applicabile se l'inquinamento è eccessivo, in quanto si determina la scomparsa totale di licheni. La metodologia proposta **consente valutazioni qualitative**, non quantitative e fornisce solo valori relativi, non assoluti.

Bioindicatori vegetali

RADICI

Insieme a fusto e foglie, la radice forma il corpo vegetativo delle piante vascolari. Svolgono funzioni importanti, tra cui, la fissazione e l'ancoraggio della pianta, nonché l'accumulo di sostanze di riserva.

È l'organo destinato ad approfondirsi nel terreno dove svolge funzioni di vario tipo. Mentre le porzioni aeree delle piante sono facilitate nello scambio dei gas, le radici sono facilitate nella **captazione dell'acqua e delle sostanze minerali**.

In merito all'impiego delle radici come indicatori di condizioni critiche e di stress dell'ambiente, si possono considerare sia l'organo intero come tale e, in particolare, le sue caratteristiche morfologiche, sia tessuti, cellule e processi fisiologici che lo interessano come i meccanismi di accumulo e di rilascio di sostanze chimiche, di metalli, di composti organici ecc.

Un'altra caratteristica delle radici che può essere sfruttata ai fini di una valutazione ecologica, è la loro capacità di realizzare unioni simbiotiche con i funghi, dette **micorrize**. Confronti tra lo stato di salute di differenti aree boscate possono essere basati, tra i vari parametri, anche sulla consistenza delle micorrize radicali.

Bioindicatori vegetali

FUSTO

Il fusto delle piante legnose è presenta sequenze di anelli più o meno concentrici.

I fenomeni ambientali possono lasciare traccia negli anelli annuali, siamo come caratteri **quantitativi** (ampiezza o la densità del legno) che **qualitative** (presenza di ferite, di tessuti particolari derivanti dalla formazioni di calli, o la presenza di canali resiniferi traumatici).

Gli anelli possano essere considerati come dei bioindicatori rispetto a qualsiasi evento capace di lasciare in essi una traccia chiaramente identificabile. Poiché ogni anello è attribuibile con estrema precisione all'anno in cui si è formato, ne deriva che anche tutte le informazioni da esso deducibili sono a loro volta databili con la stessa precisione fornendo indicazioni su lunghi periodi.

FOGLIE

Le foglie rappresentano un bersaglio preferenziale per i contaminanti atmosferici.

Essi possono determinare modificazioni che si manifestano con sintomi visibili a occhio nudo, causare alterazioni ultrastrutturali, istologiche e biochimiche osservabili solo con tecniche adeguate (sintomi invisibili a occhio nudo), accumularsi nei tessuti, senza per questo causare alcun danno, e possono essere determinati qualitativamente e quantitativamente. La valutazione dei sintomi fogliari e le analisi chimiche delle foglie possono effettuarsi sia sulla vegetazione spontanea o coltivata residente nell'area di studio, sia con piante appositamente introdotte nell'ambiente da esaminare.

Bioindicatori animali

LOMBRICHI

I lombrichi italiani, circa 90 specie, interagiscono positivamente nei suoli con le piante, sia in pieno campo che in orti e giardini; sono organismi utili e spesso fondamentali nel riciclo dei materiali organici quali radici morte e lettiere e nella loro trasformazione in composti umici e nutrienti facilmente assimilabili dalle piante.

INSETTI

Caratterizzati da un numero sterminato di specie, in grado di adattarsi alle più ostiche situazioni, molti insetti possono essere utilizzati come indicatori ambientali; la proliferazione della **mosca domestica** è un indice di abbondante presenza di residui organici e di sudiciume in genere, che consente a miriadi di larve di brulicare rapidamente; l'osservazione di alcune specie di **zanzare** in un parco cittadino segnala che gli alberi hanno vistose "carie" entro le quali si evolvono le forme giovanili.

I **Scolitidi** sono tra i Coleotteri più importanti per gli ingenti danni procurati alle piante aggredendo anche alberi in piena salute o soggetti malati già danneggiati da altri insetti.

Bioindicatori animali

INSETTI

L'ape domestica (*Apis mellifera* L.) è uno degli insetti su cui sono stati compiuti gli studi più approfonditi e pertanto è disponibile il maggior numero di dati ed è utilizzata da molti anni per saggiare in laboratorio la tossicità (per ingestione o per contatto) di prodotti impiegati in agricoltura. Le percentuali di mortalità ottenute, in una certa unità di tempo e in confronto a un testimone non trattato, consentono di classificare il principio attivo come *altamente*, *marcatamente*, *moderatamente* o *leggermente tossico* nei confronti delle api stesse.

Le api appartengono all'ordine degli Imenotteri, che comprende circa 100.000 specie.

Nella loro laboriosa vita le api favoriscono la riproduzione di numerose specie vegetali, svolgendo un'opera essenziale per la vita delle piante fanerogame.

Una colonia di api domestiche completamente sviluppata comprende alcune decine di migliaia di individui, suddivisi in tre caste: **la regina**, unica femmina fertile della colonia, **i fuchi**, cioè i maschi fertili, e **le operaie**, femmine sterili addette a tutte le operazioni necessarie al mantenimento e allo sviluppo della "famiglia": la raccolta del cibo, l'allevamento della prole, la pulizia e la difesa dell'alveare, e così via.

Bioindicatori animali

API

METODO D'USO:

E' stato messo a punto dall'Istituto Nazionale di Apicoltura di Bologna, dall'Istituto di Entomologia "Guido Grandi" dell'Università di Bologna e dal Dipartimento di Biologia applicata alla Difesa delle Piante dell'Università di Udine, tenendo conto anche delle indicazioni fornite dall'International Commission for plant-bee relationships, allo scopo di valutare in campo **gli effetti dei fitofarmaci sulle api**; ma può fornire utili indicazioni anche **per il monitoraggio dell'inquinamento agricolo o da metalli pesanti**.

Questo protocollo sperimentale, che prevede l'impiego di alveari come unità di rilevamento, si basa sull'osservazione, nell'arco di **15 giorni**, di numerose variabili, al fine di "seguire il tragitto della molecola indagata, studiarne la traslocazione dalle piante all'alveare, scoprire i punti preferenziali di accumulo e le eventuali barriere biologiche, conoscere i tempi e le cause di degradazione e di biomagnificazione nelle varie matrici per correlarle poi con le osservazioni riguardanti la forza della famiglia, l'attività di volo e di bottinamento e l'andamento meteorologico".

Bioindicatori animali

API

METODO D'USO:

1. Ogni stazione di rilevamento è costituita da almeno **4 alveari** (numero minimo per applicare i metodi di analisi statistica), omogenei per forza e scorte alimentari, introdotti nell'apezzamento all'inizio della fioritura ed equipaggiati con speciali gabbie raccogliatrici di api morte.
2. **Il trattamento antiparassitario è eseguito verso sera**, quando la coltura presenta una fioritura intorno al 30-35%.
3. La **ricerca dei residui** si effettua su: api morte, polline, miele, cera, nettare e larve, ma è indispensabile anche la valutazione soggettiva dell'attività di volo, di bottinamento e della forza della famiglia.

LIMITI D'USO:

1. Le sperimentazioni condotte **in campo** forniscono dati più attendibili rispetto a quelle di laboratorio, perché più vicine alla realtà che debbono indagare.
2. Determinazione della **mortalità delle api**, che è approssimata per difetto, poichè non tutti gli individui morti finiscono nelle gabbie di raccolta. Ad esempio perché spesso le operaie muoiono mentre stanno bottinando o perché i corpi espulsi sono allontanati dalle solerti spazzine anche a grande distanza dall'alveare.

Bioindicatori animali

RAGNI

Possono essere validamente impiegati come bioindicatori, anche se tali potenzialità non sono ancora pienamente conosciute e di conseguenza non sono ancora utilizzabili in modo del tutto efficace.

Tra i caratteri dei ragni che più si prestano allo scopo è opportuno ricordare che:

- sono esclusivamente predatori, obbligati per alimentarsi alla cattura di prede accettabili per quanto riguarda le loro caratteristiche strutturali, eco-etologiche e dimensionali;
- quasi sempre sono da poco vagili a completamente sedentari allo stadio adulto, vivendo quindi strettamente collegati agli ambienti che li ospitano;
- sono abbondantemente diffusi a livello quali-quantitativo in ogni ecosistema terrestre, mostrando una scelta di habitat estremamente raffinata;
- sono protetti da una cuticola piuttosto sottile, che con ogni probabilità non è in grado di bloccare una rapida assunzione di sostanze pericolose.

Bioindicatori animali

PESCI, RETTILI E ANFIBI

La fisiologia e le caratteristiche strutturali di questi vertebrati risentono direttamente o meno della presenza, della immissione negli ecosistemi e della quantità di sostanze e prodotti che sappiamo essere tossici e addirittura letali in determinate concentrazioni.

Diversi **insetticidi a base di cloruri organici** (come il Lindano e il tristemente famoso DDT), **insetticidi fosforati** (Trichlorofon e Dichlorvos, prodotto di degradazione del primo nell'acqua) e **l'Atrazina**, usatissimo erbicida, sono in grado in diversa misura di provocare una depressione grave delle difese immunitarie nei pesci e, presumibilmente, almeno nelle forme larvali di molti anfibi.

Tutti i **metalli pesanti** oltre ad avere tossicità diretta, sono in grado di causare immunodepressione a livello di vari meccanismi biochimici, anche attraverso una ridotta o alterata azione di diversi ormoni.

L'inquinamento atmosferico e **l'acidificazione delle acque**, si è visto che possono condizionare negativamente l'habitat degli anfibi in due modi: da un lato l'ambiente chimico viene direttamente alterato dalla riduzione dei valori di pH; dall'altro agiscono sull'ambiente biologico portando a condizioni di competizione e predazione del tutto nuove.

Nei laghi e stagni acidificati gli stadi metamorfici (girini) degli anfibi non solo vengono esposti agli effetti diretti dell'aumento di concentrazione degli ioni idrogeno, ma l'acidificazione aumenta anche l'accumulo di alluminio e altri metalli. Ad esempio nei pesci le branchie si intasano di alluminio.

Bioindicatori animali

UCELLI E MAMMIFERI

Gli uccelli sono stati più volte utilizzati per valutazioni su larga scala della qualità ambientale e per la pianificazione dell'uso del territorio, trattandosi del gruppo di vertebrati terrestri più ricco di specie e più facilmente osservabile.

Un approccio relativamente più recente risulta essere l'utilizzazione dei **mammiferi**, e in particolare dei **carnivori**, quali bioindicatori.

In precedenza, l'utilizzazione dei mammiferi quali indicatori ecologici era rimasta relegata allo studio della dispersione di sostanze tossiche nell'ambiente; si utilizzavano topi, ratti, conigli e lepri che venivano trattati come accumulatori di veleni, quali insetticidi ed erbicidi. Tali studi si svolgevano spesso all'interno di laboratori, in condizioni controllate dall'operatore e non prendevano quasi mai in considerazione ciò che poteva effettivamente verificarsi all'interno delle reti ecologiche naturali.

Negli ultimi decenni, sull'onda dell'incidente di Chernobyl, i mammiferi sono stati inoltre utilizzati anche per monitorare l'inquinamento determinato dalla fuoriuscita di elementi radioattivi.

Bioindicatori animali

UCELLI E MAMMIFERI

Molti studi di monitoraggio ambientale si basano su analisi di tipo anatomo-istopatologico, che misurano gli effetti del bioaccumulo di pesticidi nella fauna selvatica nonché la circolazione di questi composti all'interno delle catene alimentari.

I mammiferi, inoltre, sono ancora più sensibili alla distruzione degli habitat.

Se per gli uccelli, infatti, il volo facilita i fenomeni di dispersione, per i mammiferi il fatto di doversi spostare a terra compromette notevolmente la possibilità di diffondersi tra parcelle di habitat a loro idonee, le quali si trovano divise da una matrice di ambienti notevolmente trasformati dallo sfruttamento antropico e che rappresentano una barriera invalicabile per le specie di mammiferi più esigenti (come i carnivori).

LIMITI D'USO:

I mammiferi hanno una grande capacità di tamponare le variazioni ambientali (intese in senso lato), ivi comprese quelle negative, adattando i propri processi fisiologici alle mutate condizioni, grazie all'accendersi di meccanismi di riparo.

Pericolosità e destino ambientale delle sostanze chimiche

Per uno studio dettagliato di come una sostanza chimica pericolosa si distribuisce nell'ambiente si dovrebbero considerare almeno 3 (o 6) fasi:

- ❑ Aria

- ❑ Acqua

- ❑ Suolo
 - Solidi sospesi
 - Sedimenti
 - Organismi biologici

Pericolosità e destino ambientale delle sostanze chimiche

DESTINO AMBIENTALE DEI CONTAMINANTI

Alcuni parametri che indicano il destino di una sostanza chimica: la volatilizzazione (aria/acqua), l'adsorbimento (suolo/acqua) e la bioconcentrazione (biota / acqua).

Se una sostanza chimica è introdotta in un sistema così complesso e se si assume una situazione di equilibrio tra tutte le fasi, invece di introdurre tutte le equazioni di equilibrio tra le fasi e i bilanci di massa si può utilizzare il concetto di **fugacità** per determinare la distribuzione della fase della sostanza interessata.

Pericolosità e destino ambientale delle sostanze chimiche

Fugacità

Esprime la distribuzione dei contaminanti in termini di fugacità invece di concentrazione, facilita l'interpretazione dei processi dinamici a cui le sostanze sono soggette.

Esprime la tendenza di una sostanza a scappare da quella fase. E' una quantità potenziale che caratterizza la partizione in condizione di equilibrio della massa, così come la temperatura caratterizza la partizione dell'energia termica

Così come il calore muove da zone ad alta temperatura a zone a bassa temperatura, la massa si muove da zone ad alta a zone a bassa fugacità, ma non c'è diffusione se le fugacità sono uguali.

Il coefficiente che lega la concentrazione alla fugacità è la **capacità Z**

$$C = f Z$$

Dove C è la concentrazione, f è la fugacità e Z la capacità, definita per ogni sostanza a temperatura fissa.

Pericolosità e destino ambientale delle sostanze chimiche

Trasporto per lunghe distanze degli inquinanti atmosferici:

A prima vista, sembra una cosa assurda scoprire che organoclorurati e IPA, relativamente non volatili, possano migrare attraverso l'aria per migliaia di Km dal punto di rilascio fino a contaminare aree relativamente intatte del mondo come l'Artide.

Dato che la pressione di vapore di qualsiasi sostanza chimica aumenta in modo esponenziale con la temperatura, l'evaporazione avviene piuttosto nelle **aree tropicali o subtropicali** per cui queste regioni geografiche difficilmente rappresentano il deposito finale degli inquinanti.

Per contro, **le temperature fredde** dell'aria favoriscono la condensazione e l'adsorbimento dei composti gassosi sulle particelle atmosferiche sospese, gran parte delle quali vengono successivamente depositate sulla superficie terrestre.

Pericolosità e destino ambientale delle sostanze chimiche

Trasporto per lunghe distanze degli inquinanti atmosferici:

Recentemente sono state approfondite le conoscenze su questo trasporto per lunghe distanze degli inquinanti atmosferici (LRTAP, Long Range Transport of Atmospheric Pollutants) avvalendosi dei principi della chimica fisica.

Attraverso un processo globale di frazionamento (o distillazione), gli inquinanti migrano a velocità diverse depositandosi in varie regioni geografiche secondo le loro proprietà fisiche .

Alle normali temperature ambientali, molti inquinanti organici persistenti presentano una volatilità tale da consentire loro di evaporare spesso piuttosto lentamente , dal sito provvisorio sulla superficie del suolo o sui corpi idrici.

Pericolosità e destino ambientale delle sostanze chimiche

Trasporto per lunghe distanze degli inquinanti atmosferici:

Esempi di inquinanti che migrano verso le regioni polari

i benzeni altamente clorurati, gli IPA con tre anelli e i PCB, le diossine e i furani che possiedono atomi di cloro.

Sostanze con mobilità ancora maggiore

il naftalene e i benzeni meno clorurati,

non si depositano nemmeno alle temperature gelide delle regioni polari, continuano la loro migrazione più o meno all'infinito

fintanto che non subiscono una distruzione chimica, in genere attraverso una reazione avviata dalla **collisione con radicali ossidrilici**.

Pericolosità e destino ambientale delle sostanze chimiche

Trasporto per lunghe distanze degli inquinanti atmosferici:

Le sostanze con temperature di condensazione al di sotto dei -50°C : **rimangono perennemente nell'atmosfera**, dato che, nemmeno a livello delle regioni polari, si raggiungono tali temperature per un lungo periodo di tempo.

Il DDT occupa una posizione intermedia in queste scale di trasporto **evapora piuttosto rapidamente** ma la sua **temperatura di condensazione relativamente elevata** di circa 13°C sta a significare che **gran parte di esso si deposita in modo permanente** alle latitudini medie (soprattutto in inverno) e **solo una piccola percentuale migra verso l'Artide**.

Sebbene si ritenga in base al loro comportamento che i **PCB** si depositino soprattutto nelle zone temperate piuttosto che migrare in massa verso l'Artide, la loro migrazione è tuttavia **talmente elevata** che gli **animali** presenti in questa regione polare appaiono **pesantemente contaminati** da queste sostanze chimiche. Il **record mondiale di contaminazione da PCB**, che è di 90 ppm, è stato riscontrato negli orsi polari a Spitsbergen in Norvegia.

Persino il **latte materno** delle donne che vivono nelle zone più nordiche risulta maggiormente contaminato da PCB rispetto a quello delle donne che vivono nelle zone temperate. Questo è in parte da attribuire alla loro alimentazione ricca di grassi in cui si accumulano gli organoclorurati.