

METODI DI BIOMONITORAGGIO ANIMALE

Introduzione

Il biomonitoraggio animale può essere applicato per il monitoraggio dell'inquinamento di tutte le matrici ambientali (aria, acqua e suolo), purché vengano impiegati organismi e tecniche di rilevamento specifici per ognuna di esse. Allo stato dell'arte, tuttavia, la maggior parte degli studi che adottano animali si concentrano sul biomonitoraggio delle acque in primis e, secondariamente, del suolo; il biomonitoraggio dell'aria è coperto per la stragrande maggioranza da studi di biomonitoraggio vegetale (gli organismi maggiormente impiegati in questo campo sono muschi e licheni).

Le metodologie di biomonitoraggio animale (come quelle di biomonitoraggio vegetale) si possono suddividere sulla base di due diversi approcci: il bioaccumulo e la bioindicazione.

Tanto il bioaccumulo quanto la bioindicazione, nonostante i differenti metodi adottati descritti più avanti, analizzano *“componenti degli ecosistemi reattivi all'inquinamento per la stima di deviazioni da situazioni normali”*, secondo la definizione di biomonitoraggio in Nimis (1999).

Gli organismi impiegati per il biomonitoraggio, detti genericamente biosensori, possono essere scelti sia all'interno della fauna selvatica sia tra gli animali domestici o allevati. Questi ultimi sono adottati soprattutto per studi di ecotossicologia o legati alla salute umana, in quanto vivono in condizioni più controllate rispetto a quelli selvatici (soprattutto dal punto di vista dell'alimentazione e delle variabili ambientali) e si possono impiegare anche in ambienti complessi quali la casa ed il lavoro, rendendoli adatti anche a studi in ambienti artificiali. Per gli studi in ambienti non antropizzati, però, l'uso di specie introdotte artificialmente ha dei costi di mantenimento elevati e richiede più tempo, per avere una risposta, di quanto ne richieda analizzare le specie già presenti nell'area di studio.

Alcuni organismi, quali le api, possono comportarsi sia da bioindicatori che da bioaccumulatori.

BIOACCUMULO

Con il termine bioaccumulo si intende l'accumulo negli organismi di sostanze, solitamente tossiche e persistenti, presenti nell'ambiente. Questo accumulo può avvenire in diversi modi: mediante l'ingestione, mediante la respirazione o anche solamente per contatto o deposizione. L'entità di tale accumulo si assume, spesso ragionevolmente, che sia proporzionale alla concentrazione della sostanza nell'ambiente e al tempo di esposizione. In tali casi diventa possibile, partendo dalla concentrazione rilevata all'interno dell'organismo, risalire alla concentrazione ambientale della sostanza di interesse, mediante delle analisi di laboratorio; il rapporto tra questi due valori è detto fattore di bioaccumulo (BAF). Il BAF è direttamente proporzionale al tasso di assorbimento e inversamente proporzionale al tasso di eliminazione della sostanza da parte dell'organismo; con l'incremento della concentrazione del composto nell'animale, spesso, aumenta anche la velocità con cui questo viene eliminato, fino ad avere un valore costante nel tempo della sostanza

bioaccumulata, e quindi una saturazione (a meno che non sia stata raggiunta una dose letale per l'organismo).

Il bioaccumulo può essere diviso in due tipologie: attivo o passivo. Nel bioaccumulo attivo l'organismo assimila la sostanza, che quindi tende ad accumularsi all'interno delle cellule e dei tessuti dell'animale, come avviene per i metalli pesanti. Nel bioaccumulo passivo la sostanza tende a depositarsi passivamente sulle superfici esposte dell'animale, come piume o peli, ma anche sulle mucose interne.

Se ad essere bioaccumulate attivamente sono alcune sostanze inorganiche, il fattore di bioaccumulo è influenzato dal tasso di escrezione; ad esempio, negli animali con un guscio esterno carbonatico, uno scheletro od un esoscheletro, l'accumulo di piombo è maggiore rispetto a quello osservabile in altre specie, in quanto esso segue il percorso metabolico del calcio, che viene assimilato molto efficacemente.

Una particolare tipologia di bioaccumulo attivo è la **biomagnificazione**, con la quale si osserva l'aumento della concentrazione della sostanza man mano che si risale la piramide trofica; ciò accade poiché ogni specie predatrice della catena accumula al suo interno, di volta in volta, la sostanza presente in tutti gli organismi da lui predati e non riesce a eliminarla (esempi comuni sono l'accumulo di metilmercurio nei pesci e quello di DDT negli uccelli che si nutrono di insetti intossicati). Con la biomagnificazione il fattore di bioaccumulo può raggiungere valori estremamente alti, soprattutto nei predatori al vertice della piramide trofica.

REQUISITI DI UN BUON BIOACCUMULATORE

Da quanto detto finora derivano i requisiti di un bioaccumulatore ideale:

- tolleranza alle sostanze di interesse, che non devono alterarne la vitalità nel periodo di studio
- grande capacità di accumulo, per ridurre il rischio di raggiungere la saturazione dell'inquinante
- longevità sufficiente ad ottenere quantitativi rilevanti della sostanza e a studiare l'andamento delle condizioni ambientali nella loro continuità
- scarsa mobilità, con habitat degli individui circoscritto all'area di studio, per minimizzare possibili influenze esterne
- ubiquitarità e alta densità nell'area di studio, per poter raccogliere i campioni omogeneamente

Nella scelta dell'organismo bisogna anche prestare attenzione a suoi possibili adattamenti nei confronti dell'esposizione all'inquinante, assicurandosi che, durante l'esposizione, non adotti delle barriere selettive o meccanismi di espulsione delle sostanze tossiche, falsando i risultati.

A volte, inoltre, può essere conveniente campionare solo determinati organi o tessuti dell'organismo, in quanto, come vedremo tra poco, alcune matrici possono essere molto più efficienti di altre nell'accumulo di inquinanti; il campionamento dell'intero organismo, quindi, potrebbe portare a dei risultati meno significativi.

FATTORI CHE INFLUENZANO IL BIOACCUMULO

La velocità di bioaccumulo negli organismi, e quindi il BAF, dipendono da diverse variabili, ora analizzeremo le principali.

Le proprietà chimico-fisiche della sostanza analizzata

Nel bioaccumulo rivestono particolare importanza le proprietà fisiche della sostanza accumulata, come le dimensioni delle particelle (più piccole sono, maggiore è la loro possibilità di accumulo in interstizi anche molto ridotti) e il loro peso (che influenza la loro velocità di deposizione in aria), ma anche possibili interazioni elettrostatiche. Anche la natura chimica della sostanza può influenzare la velocità con cui essa viene assorbita ed eliminata dall'organismo: le sostanze lipofile, ad esempio, saranno assorbite durante la digestione molto più facilmente di quelle idrofiliche.

La proprietà chimico-fisiche della matrice

Anche per la matrice rivestono grande importanza alcune proprietà fisiche, come la superficie esposta, che può essere aumentata esponenzialmente dalla presenza di peli, piume, villi o altre irregolarità della superficie, e chimiche, come la polarità: in matrici lipidiche quali i grassi di riserva o il tuorlo delle uova, infatti, tenderanno ad accumularsi molto più facilmente le sostanze lipofile, come gli inquinanti organici.

Biologia, fisiologia, etologia e ecologia dell'organismo

Animali che presentano una buona tolleranza agli inquinanti (come ad esempio le anguille) e che quindi non evitano zone inquinate o adottano dei comportamenti che li portano frequentemente a contatto con substrati inquinati (come ratti e gabbiani), possono presentare dei fattori di bioaccumulo maggiori di altre specie che apparentemente vivono in ambienti simili ma che evitano siti inquinati.

Altro fattore che può influenzare l'entità del bioaccumulo è lo stadio riproduttivo in cui si trova l'organismo: molti animali, in vista del periodo riproduttivo, tendono ad accumulare sostanze ricche in lipidi (siano uova o grassi di riserva), e quindi, potenzialmente, anche gli inquinanti lipofili presenti nell'ambiente; arrivato il momento della riproduzione, le sostanze lipidiche, e gli inquinanti ad esse legati, subiscono una drastica riduzione (esempi classici di questo andamento sono quelli riscontrati in molti molluschi).

Le condizioni meteorologiche e climatiche

Nel periodo precedente al campionamento, almeno in ambiente terrestre, le condizioni meteo possono alterare la concentrazione delle sostanze, in particolare quelle accumulate passivamente dall'organismo (come nel dilavamento di piume e pelo).

Analogamente, in ambienti con clima secco il bioaccumulo passivo sarà maggiore rispetto agli ambienti con frequenti precipitazioni.

ESEMPIO DI STUDIO SUL BIOACCUMULO ANIMALE

Vengono di seguito riportate le analisi preliminari ad uno studio sul bioaccumulo animale, per evidenziare come venga applicata, praticamente, l'analisi delle diverse matrici e dei diversi inquinanti in uno stesso organismo.

Bioaccumulo di metalli pesanti e di idrocarburi policiclici aromatici nelle chioccioline (Pignolo, 2010)

Accumulo di metalli pesanti

La maggior parte dei contaminanti vengono assunti dai gasteropodi per ingestione e si concentrano nella ghiandola digestiva, che è l'organo più importante sia per l'accumulo che per la detossificazione nei molluschi (Amaral et al., 2004). I metalli si depositano essenzialmente all'interno del tessuto connettivo, soprattutto nei rodociti, che sono adibiti alla formazione dell'emocianina, alla sintesi del collagene e allo stoccaggio del calcio.

Le chioccioline sono capaci di inattivare i metalli come il cadmio e il rame legandoli a particolari proteine citoplasmatiche chiamate metallotioneine (Berger e Dallinger, 1997).

Alcuni metalli, come Mn, Cu, Zn e Ca possono essere assunti per contatto dell'epitelio del piede col terreno potenzialmente inquinato. I metalli entrano nelle cellule passivamente, attraverso i canali cellulari, seguendo il gradiente di concentrazione o per diffusione facilitata. In alcuni casi si può verificare anche un'assunzione per endocitosi.

Il rame è un metallo importante per i gasteropodi, in quanto è il costituente essenziale dell'emocianina ed è prevalentemente presente nel piede e nel mantello della chiocciolina. La sua concentrazione deve essere mantenuta costante e in certi casi viene accumulato in concentrazioni maggiori a quelle presenti nell'ambiente (Laskowski et al., 1996). Nello studio di Laskowski, in cui si valuta l'accumulo di Zn, Pb, Cu e Cd, somministrati attraverso la dieta a *Cornu aspersus*, si è visto che lo Zn viene assimilato proporzionalmente alla concentrazione dell'esposizione e il Cd ha un'efficienza di assimilazione del 68-72%. Il Pb, invece, viene trasferito verso il guscio, in quanto interferisce col metabolismo del calcio e provoca un indebolimento e assottigliamento del guscio (Beeby e Richmond, 2002). Infatti, alle chioccioline a cui viene fornita una dieta con del piombo la crescita della conchiglia diminuisce del 5%.

I meccanismi di detossificazione per eliminare i metalli in traccia o quelli non essenziali comprendono: ultrafiltrazione, meccanismi di trasporto attivo, inclusione in soluti che vengono espulsi con il muco o attraverso urea e acido urico. Il rilascio di muco in genere viene ridotto al minimo per minimizzare le perdite d'acqua e in questo senso vengono favoriti i meccanismi di detossificazione che comprendono la formazione delle metallotioneine e di vescicole rilasciate con le feci.

Biomonitoraggio dei metalli pesanti

Nelle chioccioline sono tanti i fattori che influiscono sull'accumulo dei metalli, per esempio il peso corporeo, la temperatura, la stagione e le piante di cui si nutrono (Berger e Dallinger, 1993).

In genere, il piede e i visceri presentano la stessa concentrazione del Cu, in quanto le chioccioline hanno una buona capacità omeostatica per questo elemento essenziale che è già presente all'interno dell'organismo nel pigmento respiratorio: l'emocianina. Invece, il Pb, lo Zn e il Cd si accumulano tendenzialmente nei visceri con valori che vanno da 2 a 50 volte quelli del piede (Gomot-de Vaufléury e Pihan, 2000).

L'esposizione di individui "sani", trasferiti dal laboratorio alle zone contaminate, permette di capire la variabilità naturale delle popolazioni di chioccioline autoctone. Di conseguenza, l'utilizzo di animali non contaminati, definiti come "bianchi", posti nel sito da monitorare, permette di individuare le differenti concentrazioni nei tessuti e di capire la variabilità naturale (Gomot-de Vaufleury e Pihan, 2000).

Per interpretare i dati delle concentrazioni dei metalli nei gasteropodi esiste in letteratura una classificazione delle concentrazioni dei metalli riscontrati nella ghiandola digestiva in base all'ambiente di campionamento. Questa classificazione, ideata da Pihan et al. (1995) e utilizzata anche da altri autori, raggruppa in classi i livelli di concentrazione presenti nella ghiandola digestiva delle chioccioline e permette di individuare il sito con contaminazione maggiore. Ciò permette di confrontare i risultati del proprio lavoro con altri esistenti in letteratura e di capire il grado di contaminazione del sito studiato.

Accumulo di IPA

Le chioccioline assorbono gli IPA dall'ambiente mediante ingestione della vegetazione, contatto col suolo o per inalazione del particolato atmosferico. E' stato osservato che i molluschi sono meno propensi e sensibili a formare addotti, (alterazioni molecolari definite dal legame covalente al DNA di composti di tipo aromatico) poiché metabolizzano il benzopirene in un intermedio meno reattivo (Dolcetti et al., 2002).

Biomonitoraggio degli IPA

E' stato visto che gli IPA a basso peso molecolare, come naftalene e fluorene, si accumulano nella ghiandola digestiva in elevate concentrazioni e in genere prevalgono su congeneri a peso molecolare elevato. L'accumulo degli IPA nelle chioccioline va a scapito dei perossisomi, ovvero si manifesta un'induzione nella proliferazione di questi organelli cellulari vescicolari, adibiti all'ossidazione degli acidi grassi, alla sintesi del colesterolo, presenti nelle cellule epatiche.

BIOINDICAZIONE

Nella bioindicazione non si studiano direttamente le concentrazioni degli inquinanti, ma gli effetti che queste hanno sugli organismi, detti bioindicatori, e quanto fortemente venga alterato lo stato naturale di questi ultimi. Tali effetti possono essere osservati a livello biochimico, fisiologico, genetico, morfologico o etologico sul singolo organismo, alterandone quindi vitalità e fitness, ma anche a livello di struttura della popolazione o di composizione della comunità (per queste ultime valutazioni sono necessarie conoscenze tassonomiche).

Solitamente, per valutare lo stato di alterazione di un ecosistema vengono analizzati più bioindicatori, allo scopo di individuare la maggiore varietà possibile di effetti su organismi che hanno risposte differenti ai diversi composti.

Si ottengono quindi delle misure qualitative dell'alterazione ambientale, essendo esse influenzate dalla sensibilità che un organismo ha ad uno o a una combinazione di inquinanti e dalle variabili ambientali.

Per poter rendere più oggettivi e confrontabili gli studi di bioindicazione, ed avendo quindi la necessità di stabilire precise definizioni, procedure e criteri di selezione delle specie impiegate, la comunità scientifica ha individuato, almeno in alcuni ambiti, diversi indici biologici, più avanti analizzati.

I bioindicatori sono scelti tra gli organismi in cui è possibile osservare una intensificazione degli effetti degli inquinanti all'aumentare della loro concentrazione ambientale, fino alla soglia in cui il bioindicatore muore. Ciò permette di creare un grafico concentrazione-effetto da cui si può quindi trarre una stima quantitativa della presenza dell'inquinante in rapporto all'entità degli effetti osservati sull'organismo.

REQUISITI DI UN BUON BIOINDICATORE

Nonostante i requisiti di un buon bioindicatore (organismo o comunità che sia) spesso dipendano dalla natura dello stesso e dal tipo e dalla durata dell'alterazione ambientale studiata, se ne possono individuare alcuni, ideali, che prescindono da queste variabili:

- Sensibilità all'inquinamento, per rilevare anche piccole alterazioni
- Resistenza ad alte dosi di inquinanti, per analizzare un ampio intervallo di alterazione ambientale
- Longevità sufficiente a mostrare gli effetti dell'inquinante e a rilevare le condizioni ambientali nella loro continuità
- Periodo di latenza ridotto tra l'esposizione e la comparsa dei sintomi
- Scarsa mobilità e habitat degli individui circoscritto all'area di studio
- Facilità di identificazione delle specie e dei sintomi
- Uniformità genetica, che non sia fonte di variabilità dei risultati
- Ubiquitarieità e alta densità degli individui, per poter campionare omogeneamente e confrontare studi provenienti da aree e ambienti diversi
- Presenza numerosa in tutto l'arco dell'anno, per permettere campionamenti ripetuti
- Economicità (particolarmente per individui introdotti attivamente nell'ambiente)

È inoltre necessaria una conoscenza adeguata di anatomia, fisiologia, etologia ed ecologia del bioindicatore per poter valutare correttamente le risposte dello stesso nei confronti dell'inquinante.

INDICI BIOLOGICI

Per poter ottenere dei risultati più oggettivi e tra loro comparabili sono stati identificati alcuni indici biologici per la valutazione della qualità di acqua, aria e suolo.

Gran parte degli indici elaborati adottano come bioindicatori intere popolazioni o comunità, e possono essere divisi in tre grandi gruppi: indici saprobici (limitati agli ambienti di acqua corrente), indici di diversità e indici biotici.

Gli indici saprobici analizzano l'inquinamento dei corsi d'acqua studiando la frequenza relativa di specie sensibili, che dovrebbero essere più numerose in acque poco inquinate, e specie tolleranti, più abbondanti in

acque inquinate. Limiti: sono applicabili solo in acque correnti e rilevano principalmente inquinanti organici metabolizzabili. Il primo di questi indici fu il Saprobien System di Kolkowitz e Marsson, creato nel 1902; da questo derivarono poi molti degli indici biologici, non solo saprobici, successivi.

Gli indici di diversità analizzano dati quantitativi sulla ricchezza in specie e sulle proporzioni specifiche all'interno della comunità. Questi indici assumono che ambienti poco inquinati abbiano una maggiore biodiversità e non presentino specie dominanti sulle altre all'interno della comunità. Limiti: questi indici non sono applicabili in ambienti oligotrofi, non sono comparabili tra ambienti diversi e sono laboriosi, poiché l'individuazione esaustiva di tutte le specie che compongono una comunità è un compito molto impegnativo. Gli indici di diversità più diffusi sono quelli di Simpson, di Shannon e di McIntosh.

Gli indici biotici analizzano la comunità valutando sia la sua biodiversità (sono sufficienti dati semi-quantitativi, che descrivono le proporzioni relative tra le specie) sia la sensibilità all'inquinamento delle specie presenti. Per ogni area di studio si compara la comunità presente con la comunità ideale che quell'ambiente dovrebbe avere se non ci fosse alcuna alterazione ambientale. A questa categoria appartengono la maggior parte degli indici adottati nell'ultimo secolo. Limiti: anche questi indici non sono applicabili in ambienti oligotrofi e neppure in ambienti naturalmente instabili o che non hanno ancora raggiunto un equilibrio (come gli habitat in fase di ricolonizzazione) o in ambienti di transizione (come le foci dei fiumi, dove si verificano risalite del cuneo salino). Esempi di indici biotici sono quelli che studiano le comunità macrobentoniche nelle acque dolci, come il Trent Biotic Index e gli indici da esso derivati (E.B.I, I.B.E. e altri), le comunità ittiche (ISECI) o le comunità di nematodi nei suoli (Maturity Index 2-5).

ESEMPI DI INDICI BIOLOGICI

Vengono ora riportati, a titolo di esempio, alcuni indici, per evidenziare le applicazioni pratiche di quanto detto finora.

Saprobien System:

Studia le alterazioni delle comunità bentoniche prodotte dall'autodepurazione dei corsi d'acqua a valle di una fonte di inquinanti organici metabolizzabili.

Gli organismi analizzati appartengono a numerosi taxa, molto diffusi in Europa

Centrale, di micro e macroorganismi bentonici; queste due categorie di organismi sono impiegate per creare 2 indici diversi, dove quello ottenuto dai microorganismi reagisce all'inquinamento in tempi più ridotti rispetto a quello ottenuto dai macroorganismi.

La formula che descrive l'indice è (Fig.1), dove "S_i" è il valore saprobico del taxon i (indica cioè quanto la specie è caratteristica di ambienti inquinati), "G_i" è il peso indicatore caratteristico del taxon, e "A_i" è il valore di abbondanza del taxon (suddiviso in 7 intervalli, da "singolo individuo" a "in massa"). Più alto è il valore dell'indice (che solitamente varia tra 1 e 4), maggiore è l'inquinamento.

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n S_i \cdot A_i \cdot G_i}{\sum_{i=1}^n A_i \cdot G_i}$$

Fig.1

L'indice in tal modo individua 4 zone con valori decrescenti di carico organico: polisaprobica, α -mesosaprobica, β -mesosaprobica e oligosaprobica.

Indice di Simpson:

Indice di diversità che valuta il peso di ciascuna specie sul numero totale di individui presenti nella comunità.

$$I = \frac{\sum n_i (n_i - 1)}{N (N - 1)}$$

Fig.2

La formula che descrive l'indice è (Fig.2), dove "n_i" è il numero di individui della specie i e "N" è il numero totale di individui della comunità.

L'indice assume sempre valori tra 0 e 1 e, più si avvicina a 0, maggiore è la diversità della comunità.

Indice Biotico Esteso (IBE)

L'IBE analizza le comunità di macroinvertebrati bentonici dei corsi d'acqua e come queste vengono modificate da possibili alterazioni di origine antropica. Furono scelti questi organismi per la loro scarsa mobilità e per la relativa facilità del riconoscimento, dovuta alle loro dimensioni macroscopiche e al livello di identificazione dei taxa, che si ferma alla famiglia o al genere, senza dover arrivare alla specie.

Gruppi Faunistici che determinano con la loro presenza l'ingresso orizzontale in tabella (primo ingresso)		Numero totale delle Unità Sistematiche costituenti la comunità (secondo ingresso)									
		0-1	2-5	6-10	11-15	16-20	21-25	26-30	31-35	36-...	
Plecoteri presenti (<i>Leuctra</i> °)	più di una U.S.	-	-	8	9	10	11	12	13*	14*	
	una sola U.S.	-	-	7	8	9	10	11	12	13*	
Efemerotteri presenti (escludere Baetidae, Caenidae)°°	più di una U.S.	-	-	7	8	9	10	11	12	-	
	una sola U.S.	-	-	6	7	8	9	10	11	-	
Tricotteri presenti (comprendere Baetidae e Caenidae)	più di una U.S.	-	4	6	7	8	9	10	11	-	
	una sola U.S.	-	5	5	6	7	8	9	10	-	
Gammaridi e/o Atiidi e/o Palemonidi presenti	tutte le U.S. sopra assenti	-	4	5	6	7	8	9	10	-	
Asellidi e/o Niphargidi presenti	tutte le U.S. sopra assenti	-	3	4	5	6	7	8	9	-	
Oligocheti o Chironomidi	tutte le U.S. sopra assenti	1	2	3	4	5	-	-	-	-	
Altri organismi	tutte le U.S. sopra assenti	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

Fig.3

Uno dei principali fattori che chi

applica questo indice deve tenere in considerazione sono le fluttuazioni della composizione delle comunità nell'arco dell'anno, fortemente influenzate dagli sfarfallamenti di molti insetti quando arrivano allo stadio di maturità.

Nella tabella (Fig.3) l'entrata orizzontale considera l'aspetto di sensibilità agli inquinanti (i primi taxa sono i più sensibili), mentre l'entrata verticale tiene conto del grado di biodiversità e considera il numero totale di taxa che costituiscono la comunità; all'incrocio tra righe e colonne si possono individuare i valori dell'indice, i quali, più alti sono, minore è l'alterazione di origine antropica.

Questo indice si è poi evoluto nell'indice STAR_ICMi, che introduce, tra le modifiche più importanti, il campionamento degli organismi in più habitat dello stesso tratto di fiume ("campionamento multihabitat proporzionale"), valutando la tipologia di substrato, per rendere omogenei i diversi campionamenti.

Indice di Qualità (IQ)

L'IQ è un indice che valuta lo stato dei suoli sottoposti a contaminazione da sostanze tossiche (in particolare i terreni agricoli) analizzando le comunità di artropodi appartenenti alla meso e macrofauna. Originariamente nell'identificazione era sufficiente fermarsi al livello tassonomico dell'Ordine, ma alcuni studi hanno consigliato, almeno per i taxa più sensibili, di identificare anche la specie.

I parametri considerati dall'indice sono due: *la diversità*, data dal numero complessivo di Unità Tassonomiche identificate; e *l'abbondanza*, data dal numero totale di individui raccolti.

Il valore dell'indice si ottiene dalla seguente formula $IQ = \frac{nUT_{\text{campione}}}{nUT_{\text{controllo}}} + \frac{N_{\text{campione}}}{N_{\text{controllo}}}$ dove "nUT" è il numero di Unità Tassonomiche identificate e "N" è il numero totale di individui raccolti.

Il valore che si ottiene è compreso tra 0 e 2, dove valori vicini allo 0 indicano che biodiversità e abbondanza del campione sono nulle, e valori vicini a 2 indicano una biodiversità e un'abbondanza simili a quelle del controllo. È a cura di chi applica l'indice l'individuazione di un controllo adatto.

BIOACCUMULO E BIOINDICAZIONE A CONFRONTO

	BIOACCUMULO	BIOINDICAZIONE
Biosensori adottati	Singoli individui, loro parti o uova	(Individui), popolazioni o comunità
Metodiche adottate	Quantificazione delle sostanze accumulate	Analisi dello scostamento dalle condizioni di naturalità
Misurazioni degli inquinanti	Dirette e quantitative	Indirette e qualitative
Analisi degli inquinanti	Individuano i singoli inquinanti Effetti sinergici rilevati raramente	Non individuano singoli inquinanti Rilevazione degli effetti sinergici e del danno alla componente biotica
Intervallo di tempo analizzato	Da giorni a mesi	Da settimane ad anni
Requisiti specifici	Analisi in laboratorio	Conoscenze tassonomiche

Bibliografia

- Amaral A, Anselmo H, Toste Tristão da Cunha M, Rodrigues A, 2004 – *The connective tissue index of Helix aspersa as a metal biomarker* – BioMetals, 17, 625–629
- ANPA, 2000 - *Indicatori e indici ecotossicologici e biologici applicati al suolo - Stato dell'arte* – RTI CTN_SSC 3/2000
- APAT, 2004 - *Proposta di guida tecnica su metodi di analisi per il suolo e i siti contaminati - Utilizzo di indicatori biologici ed ecotossicologici* - RTI CTN_TES 1/2004
- Beeby A, Richmond L, 2002 - *Lead reduces shell mass in juvenile garden snails (Helix aspersa)* - Environmental Pollution, 120, 283-288
- Berger , Dallinger R, 1997 - *Metallothionein in snail Cd and Cu metabolism* – Nature, 388, 237
- Capriglia L, 2008 -*Studi sul bioaccumulo di microinquinanti organici ed inorganici tramite Mytilus galloprovincialis in prossimità di un sito costiero contaminato* – Tesi di Dottorato di Ricerca in Metodologie di biomonitoraggio dell'alterazione ambientale, Università degli Studi di Trieste
- Depledge M, 1994 - *Ecotoxicology in Theory and Practice* – Forbes VE and Forbes TL, Chapman and Hall, London
- Dolcetti L, Dalla Zuanna L, Venier P, 2002 - *DNA adduct levels in mussels and fish exposed to bulky genotoxic compounds* - Mar Environ Res, 54, 481-486
- Gomot-de Vaufleury A, Pihan F, 2000 - *Growing snails used as sentinels to evaluate terrestrial environment contamination by trace elements* – Chemosphere, 40, 275-284
- Laskowski et al., 1996 - *Accumulation of Zn, Cu, Pb and Cd in the garden snail (Helix aspersa): implication for predators* - Environmental Pollution, 91 (3), 289-297
- Nimis PL, 1999 - *Linee guida per la bioindicazione degli effetti dell'inquinamento tramite la biodiversità dei licheni epifiti* - In: Piccini C, Salvati S (Eds.) - *Atti Workshop Biomonitoraggio Qualità dell'aria sul territorio Nazionale* - ANPA, Ser. Atti, 2, 267-277

Pignolo G, 2010 – *Studio su gasteropodi terrestri come potenziali bioaccumulatori per metalli pesanti ed idrocarburi policiclici aromatici nella provincia di Trieste* – Tesi di Dottorato di Ricerca in Metodologie di biomonitoraggio dell’alterazione ambientale, Università degli Studi di Trieste

Pihan J, Mrhain E, Promeyrat S, Pihan F, 1995 - *Contamination métallique des escargots d'élevage et de la nature - Proposition de grilles de qualité (Cu, Zn, Fe, Mn, Cr, Pb)* - Journée Nationale Hélicicole, ITAVI, GNPE, LYON, 1-20

Pizzul E, 2015 – Dispensa e presentazioni per il corso di Biomonitoraggio delle Acque Dolci

Rombolà P, Battisti S, Scaramozzino P, 2012 - *Biomonitoraggio animale e microinquinanti in sanità pubblica – Rassegna bibliografica* - Epidemiol Prev, 36 (5) suppl 4, 5-14

Sartori F (a cura di), 1998 - *Bioindicatori ambientali* - Fondazione Lombardia per l’Ambiente, Milano

Scaglia P, 2009 - *Il monitoraggio biologico negli ambienti fluviali: applicazione di metodi tradizionali e metodi conformi alla Direttiva 2000/60/CE basati sullo studio delle comunità dei macroinvertebrati* – Tesi di Laurea Specialistica in Gestione e Valorizzazione delle Risorse Naturali, Università degli Studi di Pisa

Sitografia

<http://www.isprambiente.gov.it>, consultato il 30/12/2016

http://www.pipam.it/index.php?option=com_content&view=article&id=217:indicatori-biologici-ed-indici-biotici&catid=52&Itemid=73, consultato il 1/1/2017