

# I BIOINDICATORI DELLA QUALITÀ AMBIENTALE<sup>1</sup>

ROBERTO BARGAGLI

*Università di Siena, Dipartimento di Scienze Fisiche, della Terra e dell'Ambiente*

Molti dati ambientali forniti dai mezzi di informazione non sono facilmente comprensibili e si prestano anche ad interpretazioni distorte o strumentali. Anche la qualità ambientale (l'insieme delle caratteristiche e proprietà di un ambiente naturale o antropizzato), con una visione antropocentrica e piuttosto riduttiva, viene spesso intesa come la misura della capacità di un ambiente di soddisfare le esigenze (materiali, economiche e sociali) dell'uomo. Nel caso del suolo, per esempio, molti ritengono che esso sia di qualità se è in grado di assicurare buoni raccolti. Ma il suolo svolge molti altri importanti "servizi ecologici" come il mantenimento della diversità di piante, animali e microrganismi, la regolazione del ciclo dell'acqua e del carbonio, l'attenuazione dei possibili effetti degli inquinanti ambientali e dei microrganismi patogeni, il mantenimento dell'integrità del territorio (prevenzione di frane e smottamenti, riduzione del trasporto solido e salvaguardia delle zone umide). Quindi, la produzione di alimenti è solo uno dei principali servizi forniti dal suolo e la fertilità è solo una delle tante proprietà conferite al suolo dalle sue caratteristiche fisiche, chimiche e biologiche.

## 1. Il biomonitoraggio ambientale.

Scopo di questa lezione è quello di illustrare il ruolo degli organismi nel rilevare la qualità dell'aria, dell'acqua e del suolo e di far comprendere come il biorilevamento costituisca un indispensabile complemento alle procedure di monitoraggio chimico-fisico, previste dalle normative per la protezione della salute e dell'ambiente. L'osservazione diretta delle risposte fornite da opportuni bioindicatori, consente la valutazione personale della qualità ambientale, aumenta la consapevolezza degli studenti e li aiuta a comprendere/interpretare il loro territorio ed dati forniti dalle agenzie (nazionali e territoriali) [1]. Le piante, sono state impiegate per secoli come indicatrici della fertilità dei suoli o dell'eventuale presenza di acqua e di depositi di minerali nel sottosuolo. In Cina, già nel 1000 a.C., le aree da destinare ad attività agricole venivano individuate con la mappatura della vegetazione; si conoscevano le specie tipiche delle aree con depositi di ferro e rame e durante la dinastia Ming si ottenevano metalli come Cu ed Ag dal loro incenerimento. In Europa, nel 1556 fu pubblicato il primo trattato sull'attività mineraria e metallurgica ("*De re metallica*") e l'autore (Georg Bauer; Agricola) suggeriva di "leggere i segni della natura" per individuare i depositi metalliferi perché

<sup>1</sup> Lezione tenuta il 15 novembre 2012 presso il Liceo Scientifico "N. Rodolico", Firenze e il 6 dicembre 2012 presso IIS "A. Poliziano" e ISIS "Redi-Caselli", Montepulciano (SI).

sopra di essi crescono determinate specie di piante diverse da quelle presenti nelle aree circostanti. Ebbero così inizio le prospezioni geobotaniche, tuttora applicate nei paesi come Russia, Canada o Australia che hanno vaste porzioni di territorio poco esplorate. Gli studenti delle scuole toscane possono compiere interessanti esperienze di ricerca sulla vegetazione dei numerosi affioramenti di rocce ignee (serpentine) come quelli del Monte Ferrato o della Valle del Cecina. Alcune piante endemiche di queste zone come *Alyssum bertolonii* possono accumulare nei loro tessuti oltre il 5% di nichel! Le piante servono anche per comprendere la natura del suolo (es. le gariche nei substrati calcarei e le brughiere in quelli silicei) ed altre importanti esperienze (sul campo ed in laboratorio) possono esser fatte dagli studenti sulla vegetazione o le comunità edafiche (acari, collemboli, molluschi, lombrichi, ecc.) nei suoli con diversi valori di pH. Comunque, dopo la Rivoluzione Industriale, con lo sfruttamento del carbone e delle altre risorse del sottosuolo ed il progressivo inquinamento ambientale, gli organismi vegetali hanno assunto un ruolo importante soprattutto come *biomonitors* della qualità dell'aria, dell'acqua e del suolo.

Il monitoraggio chimico-fisico della qualità dell'aria e nell'acqua è difficile e costoso, perché molti contaminanti sono presenti in concentrazioni minime ed estremamente variabili nello spazio e nel tempo. Molte specie di muschi, licheni e piante vascolari esposte agli inquinanti possono mostrare specifici effetti tossici (bioindicatori) e/o possono accumulare nei loro tessuti i contaminanti persistenti (bioaccumulatori) in concentrazioni superiori di ordini di grandezza rispetto a quelle presenti in aria o in acqua. Quindi, la determinazione delle concentrazioni di inquinanti nei tessuti vegetali è più semplice e non richiede campionamenti ripetuti perché i bioaccumulatori integrano nel tempo ciò che è biodisponibile nel loro ambiente. Le specie da impiegare come bioindicatori debbono fornire specifiche risposte agli inquinanti (a livello molecolare, biochimico, di tessuti o organi, di specie, di popolazioni o comunità), mentre i bioaccumulatori debbono essere abbastanza resistenti ai più comuni inquinanti atmosferici e capaci di accumulare quelli persistenti in concentrazioni che riflettono quelle mediamente presenti in aria, in acqua o nel suolo. Per effettuare il biomonitoraggio su larga scala (es. il territorio di un comune o di una provincia) è necessario che la specie prescelta abbia un'ampia distribuzione ed *optimum* ecologico nell'area di studio, sia di facile identificazione, reperibile in tutte le stagioni ed abbia una biomassa adeguata per le analisi di laboratorio. Il biomonitoraggio viene detto passivo se le osservazioni e/o le analisi chimiche utilizzano organismi naturalmente presenti nell'area di studio mentre è di tipo attivo se vengono opportunamente esposti (es. in una città) dei muschi o licheni raccolti in aree poco o affatto contaminate. Se correttamente impostato ed eseguito il biomonitoraggio fornisce con poca spesa ed in tempi brevi, dati qualitativi e/o quantitativi complementari a quelli rilevati nelle stazioni di monitoraggio. Di solito, i risultati vengono riportati come indici sintetici o mappe con diversi colori, facilmente accessibili anche agli studenti ed alla popolazione in generale. Questi approcci consentono di rilevare gli effetti biologici (integrati nel breve e medio termine) degli inquinan-

ti, la loro distribuzione spaziale (anche in aree remote) ed eventualmente, di ricostruire la storia dei processi di inquinamento. Di seguito vengono descritti alcuni dei metodi di biomonitoraggio tra quelli più diffusi e facilmente applicabili anche nelle scuole.

## 2. Biorilevamento della qualità dell'aria

L'aria che respiriamo ha una composizione estremamente variabile, sia a causa delle molteplici sorgenti di emissione dei contaminanti (antropiche e naturali, istantanee e continue, puntiformi e diffuse, mobili e fisse), sia per la variabilità delle condizioni climatiche ed ambientali che influiscono sulla dispersione, deposizione e sull'eventuale trasformazione degli inquinanti primari in secondari (es. l'O<sub>3</sub> troposferico). Negli ultimi decenni, anche in conseguenza di eventi molto gravi come il *Great Smog* di Londra (1952) o gli incidenti di Seveso (1976) e Bopal (India, 1984), è aumentata la consapevolezza dei problemi igienico-sanitari ed ambientali posti dall'inquinamento atmosferico, ma nonostante l'introduzione di nuove norme e tecnologie, come riporta anche un recente rapporto dell'OMS [2], in molte aree urbane il problema è ancora largamente irrisolto. La soluzione non attiene solo alla sfera scientifica o tecnologica, ma richiede scelte politiche e crescita della cultura per lo sviluppo sostenibile per favorire il rispetto dei trattati internazionali per la riduzione delle emissioni, il risparmio energetico, la produzione di energia da fonti rinnovabili, la revisione del sistema dei trasporti ecc.. I sistemi automatici di monitoraggio (le centraline) collocate nelle aree urbane ed industriali, hanno elevati costi di acquisto e di gestione, forniscono dati di tipo puntiforme e su un numero limitato di inquinanti (alcuni di questi, come l'O<sub>3</sub>, si formano anche in zone rurali); quindi, non consentono di prevedere i possibili effetti biologici (spesso sinergici o additivi) dell'esposizione cronica alla complessa miscela d'inquinanti presenti nell'aria delle nostre città.

## 3. Licheni e muschi come biomonitori

I licheni sono una associazione simbiotica tra un fungo (micobionte) ed un'alga (fotobionte), sono privi di radici e cuticole cerose e per il loro nutrimento dipendono dalle deposizioni atmosferiche. Le ife fungine che formano il tallo, avvolgono le alghe e le proteggono da radiazioni eccessive e dall'essiccamento, forniscono loro acqua e soluti ed in cambio ricevono dall'alga i prodotti della fotosintesi. La simbiosi è una di quelle di maggior successo sulla Terra ed i licheni crescono anche negli ambienti più estremi, come i deserti freddi dell'Antartide, ma, a causa degli scambi con l'atmosfera, subiscono gli effetti degli inquinanti fitotossici come SO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, NO<sub>x</sub>, HF. Da oltre due secoli è nota la loro sensibilità specie-specifica agli inquinanti, dipendente soprattutto dalla loro morfologia e dalla superficie di scambio con l'aria (le forme fruticose e fogliose sono molto più sensibili di quelle crostose). Basandosi sul numero di specie presenti nelle comunità, sono stati elaborati diversi indici di qualità dell'aria (*Index of Atmospheric Purity*, IAP) ed il metodo ANPA [3], applicato anche in molte scuole, prevede il rilevamento del numero di specie sul tronco di alberi, per lo più a scorza acida come tigli e querce. La procedura è standardizzata, richiede minime conoscenze

di sistematica e fornisce dati oggettivi sulla qualità dell'aria, soprattutto in aree con condizioni climatiche piuttosto omogenee. In ogni stazione di rilevamento si scelgono 3-12 alberi della stessa specie, con tronco diritto e circonferenza di almeno 70 cm; nei 4 punti cardinali del tronco, ad 1 m di altezza dal suolo, si applicano dei telai, ognuno con 5 quadrati di 10x10 cm; si rilevano le specie all'interno di ciascun quadrato e la loro frequenza (il numero di maglie nella quale sono presenti). Dalla somma delle frequenze di tutte le specie presenti in ciascun telaio ed in ciascun albero e dalla media dei valori rilevati negli alberi degli stessa stazione si ricava l'indice di diversità lichenica. I risultati consentono di tracciare mappe dell'inquinamento atmosferico, utili per la localizzazione di centraline di monitoraggio o per validare i dati dei modelli di trasporto e deposizione degli inquinanti. Con l'analisi delle concentrazioni di inquinanti nei talli di specie più resistenti (bioaccumulatori) si ottengono mappe di deposizione di molti degli inquinanti non rilevati nelle centraline come metalli pesanti, radionuclidi e composti organici persistenti (es. IPA: Idrocarburi Policiclici Aromatici e PCB: Policlorobifenili).

I muschi hanno molte caratteristiche in comune con i licheni: mancano di apparato radicale, sono ampiamente distribuiti anche nelle regioni estreme e dipendono dalle deposizioni atmosferiche per il loro metabolismo. I fusticini dei muschi hanno foglioline (spesso costituite da un unico strato di cellule) e nelle specie ectoidriche (prive di vasi di trasporto) mancano di cuticole superficiali. Quindi, come nei licheni, tutta la superficie esterna dei muschi assorbe acqua, ioni ed i contaminanti atmosferici. I muschi vengono utilizzati soprattutto come bioaccumulatori (passivi ed attivi) dei contaminanti poiché hanno anche una morfologia adatta ad intrappolare la particelle aerotrasportate. La tecnica è stata sviluppata intorno al 1970 nei paesi scandinavi per valutare le "importazioni" dai paesi dell'Europa centrale di acidità, metalli, radionuclidi e composti organici persistenti (POP). Da allora, ogni 5 anni, il Nordic Council of Ministers promuove il biomonitoraggio con i muschi su scala sovranazionale per rilevare i *trends* spazio-temporali delle deposizioni di inquinanti. Il metodo prevede la raccolta di una specie di muschio tra quelle più diffuse nell'aria di studio (ad almeno 5 m di distanza dalla chioma degli alberi e 200 m da costruzioni e strade) e le analisi chimiche in laboratorio, della porzione apicale dei caulidi (di colore verde), che corrisponde alla biomassa prodotta negli ultimi 2-3 anni. Nelle aree urbane ed industriali dove non è sempre possibile reperire campioni di muschio e licheni, i talli dei licheni ed i caulidi dei muschi, raccolti in aree ad elevata naturalità, opportunamente preparati ed esposti in reticelle di nylon (*moss bags*) per diverse settimane o alcuni mesi, costituiscono una delle metodologie più semplici ed a basso costo per acquisire mappe di deposizione dei contaminanti persistenti.

Un ulteriore vantaggio dei biomonitori rispetto ai sistemi convenzionali di monitoraggio è la possibilità di effettuare indagini retrospettive sull'andamento delle deposizioni atmosferiche di contaminanti. Possono essere analizzate porzioni dei talli dei licheni o foglie di alberi (es. aghi delle conifere) di diversa età, oppure gli anelli di

accrescimento del tronco degli alberi. Quest'ultimo approccio (*dendrochemistry*) si basa sul presupposto che i contaminanti assorbiti dalle radici siano accumulati nel tessuto legnoso prodotto in quell'anno, senza trasferimento radiale agli altri anelli e necessita di specie arboree a legno duro come querce o olmi. Comunque, le migliori ricostruzioni storiche si ottengono con l'analisi delle sezioni di carote prelevate nelle torbiere. [4] Nei climi freddi, la materia organica prodotta annualmente dagli sfagni va incontro a lentissima degradazione e si accumula formando i depositi di torba; se i muschi si sono sempre sviluppati al di sopra del livello delle acque (ombrotrofici) la composizione chimica della torba riflette quella delle deposizioni atmosferiche.

#### 4. Il ruolo delle piante vascolari

Sebbene le foglie delle piante vascolari siano protette dalle cere epicutcolari, circa il 2% della loro superficie è occupata dagli stomi ed i contaminanti gassosi come  $\text{SO}_2$ ,  $\text{O}_3$  ed HF possono penetrare all'interno. Nel caso dell' $\text{O}_3$  troposferico per esempio, le piante hanno sistemi enzimatici e producono sostanze antiossidanti per detossificare/neutralizzare le specie reattive dell'ossigeno (ROS), ma se le concentrazioni di  $\text{O}_3$  sono elevate si ha riduzione della fotosintesi, clorosi delle foglie e scarsa resa agronomica delle colture. La cultivar Bel-W3 della pianta di tabacco è molto sensibile all' $\text{O}_3$  e manifesta tipiche lesioni anche per esposizioni di poche ore, a concentrazioni di soli 40 ppb. [5] Spesso le concentrazioni di  $\text{O}_3$  sono più elevate nelle zone agricole e forestali che nelle città e l'esposizione di piante di tabacco consente di acquisire informazioni sulla sua distribuzione anche nelle zone prive di centraline di rilevamento. Il biomonitoraggio può essere eseguito anche dalle scolaresche, nell'ambito di programmi di educazione ambientale, addestrando gli studenti alla valutazione dell'intensità del danno di ogni foglia, mediante il confronto con tavole iconografiche, che rappresentano la distribuzione delle aree necrotiche in foglie di diversa età. L'inquinamento da fluoruri determina la necrosi degli aghi di pino o dei margini e degli apici delle foglie di molte piante ornamentali (es. gladioli e tulipani) o degli alberi da frutto (pesco, vite, ciliegio) ed anche in questo caso gli studenti possono eseguire esperienze di biomonitoraggio in prossimità di impianti per la produzione di laterizi, ceramiche e cristalli, ampiamente distribuiti nel territorio della Toscana.

La maggior parte delle piante vascolari prevengono l'assorbimento e la traslocazione degli inquinanti presenti nel suolo immobilizzandoli nella membrana plasmatica delle radici e grazie a questa capacità di "esclusione" riescono a crescere anche in aree con suoli inquinati, mantenendo piuttosto costante la composizione chimica dei loro tessuti. Per questo motivo, negli ultimi decenni, le foglie di molte specie vegetali ad ampia distribuzione, sono state impiegate come bioaccumulatori delle deposizioni di metalli e inquinanti organici. Il biomonitoraggio con le piante erbacee è l'unico approccio possibile per poter valutare il trasferimento dei contaminanti persistenti negli erbivori. La morfologia della pianta e delle foglie gioca un ruolo importante nell'ad/assorbimento degli inquinanti e oltre agli aghi delle conifere, vengono impiegate le

foglie di faggio, pioppo, quercia, robinia e ailanto. Il leccio (*Quercus ilex* L.) è uno degli alberi più comuni della macchia mediterranea ed è ampiamente diffuso nei viali e nei parchi di molte città italiane; le foglie persistono sui rami per circa 3 anni ed hanno una morfologia particolarmente adatta per l'accumulo dei contaminanti atmosferici persistenti. Biomonitoraggi con foglie di leccio hanno consentito di acquisire mappe di deposizione di metalli in tracce ed IPA in numerose città italiane come Firenze, Siena, Roma, Napoli e Palermo. Nell'area urbana di Firenze i *patterns* di accumulo degli elementi in tracce nelle foglie di leccio riflettono quelli rilevati nei campioni di particolato atmosferico PM<sub>10</sub>, analizzato con le stesse procedure e raccolto nelle centraline di monitoraggio situate in prossimità dei lecci.

### 5. Bioindicatori della qualità dell'acqua e del suolo

Le prime proposte di valutazione biologica della qualità delle acque risalgono ad oltre un secolo fa e si basavano sulle variazioni di composizione delle comunità biotiche in relazione all'inquinamento organico ed alla disponibilità di O<sub>2</sub>. Nei corsi d'acqua, i macroinvertebrati bentonici (generalmente >1mm) compiono spostamenti limitati, sono facilmente campionabili, comprendono taxa con ciclo biologico abbastanza lungo ed hanno diversa sensibilità agli inquinanti. Da molti anni in Italia viene applicato con successo, anche da parte di molte scuole, l'Indice Biotico Esteso (IBE) [6]. I valori dell'indice vengono raggruppati in 5 classi di qualità, facilmente visualizzabili sulle mappe dei corsi d'acqua, mediante l'impiego di colori o retinature; forniscono informazioni di tipo integrato ed hanno buona capacità di sintesi. Per una valutazione complessiva della qualità dei corsi d'acqua, viene applicato anche l'Indice di Funzionalità Fluviale (IFF) [7] che, oltre ai dati sulle comunità del macrobenthos e delle piante acquatiche, considera anche la morfologia delle rive e dell'alveo, la vegetazione delle fasce ripariali, le condizioni idriche, le strutture di ritenzione in alveo e lo stato di decomposizione della materia organica. La scheda per la rilevazione dell'IFF prevede 14 domande (ciascuna con quattro risposte predefinite ed un valore numerico che individua in modo relativo, l'importanza della caratteristica definita). La compilazione della scheda termina con il calcolo della somma dei valori e la definizione dello *score*, che può assumere valori compresi tra 14 e 300. Anche i valori dell'IFF sono riconducibili a 5 livelli con giudizio di funzionalità e relativo colore. Abbastanza diffuso è l'impiego delle diatomee epilitiche, caratterizzate da sensibilità specie-specifica alle variazioni delle concentrazioni di materia organica, nutrienti e cloruri. Anche le diverse specie di macrofite acquatiche hanno specifiche esigenze trofiche ed ecologiche e sono ritenute un'utile strumento di valutazione dello stato ecologico di fiumi e laghi. Sono stati proposti diversi indici biotici anche per le comunità ittiche, basati sul fatto che in condizioni di "naturalità" esse dovrebbero ospitare popolazioni indigene in buone condizioni ed essere prive di specie alloctone. Il valore dell'indice si ottiene dalla comparazione tra una comunità ittica attesa e quella reale, dai dati sull'abbondanza dei pesci e sulla loro struttura in classi di età.

Come gli ecosistemi acquatici, anche i suoli sono capaci di autodepurarsi e in funzione delle loro caratteristiche, possono ridurre la biodisponibilità dei contaminanti mediante l'attività dei microrganismi e processi di adsorbimento, complessazione e precipitazione. Tuttavia, ogni suolo ha una determinata capacità di autodepurazione e la sua funzionalità può subire danni irreversibili in conseguenza di inquinamenti di tipo acuto o cronico e/o di variazioni delle condizioni ambientali. La funzionalità di molti agroecosistemi è gravemente compromessa dall'uso di sostanze xenobiotiche come diserbanti, insetticidi e fungicidi ed anche nelle aree urbane, industriali ed in quelle con discariche, la composizione e la struttura delle comunità edafiche possono risultare profondamente alterate. La pedofauna influenza la capacità di resilienza di un suolo ed i parametri biotici (abbondanza, diversità, struttura delle reti trofiche e stabilità delle comunità) stanno assumendo un ruolo sempre più importante come indicatori della qualità e della funzionalità del suolo. Anche per i suoli, sono stati definiti degli indici biotici, sia qualitativi (che prescindono dal numero di individui presenti nel campione e si basano sul valore indicatore di alcuni taxa), che quantitativi (basati sulla valutazione della ricchezza in taxa e della loro composizione). [8] Tuttavia, mentre i primi bioindicatori dell'inquinamento atmosferico e delle acque furono individuati sin dagli inizi del secolo scorso ed hanno acquisito notevoli livelli di diffusione e standardizzazione, nel caso dei suoli, le tecniche di biomonitoraggio hanno avuto un sviluppo molto più recente e tardano ad affermarsi, anche a causa della complessità delle comunità edafiche e delle conoscenze tuttora insufficienti sull'ecofisiologia di molte specie.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Bargagli, R., *Ecologia Applicata. Per un Uso Consapevole dell'Aria, dell'Acqua e del Suolo*. Amon, Padova 2012.
- [2] World Health Organization, *Review of Evidence on Health Aspects of Air Pollution-First results*, WHO Regional Office for Europe, Copenhagen 2013.
- [3] ANPA, *Indice di Biodiversità Lichenica*, Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente, Manuali e Linee Guida, Roma 2001.
- [4] Bargagli, R., *Trace Elements in Terrestrial Plants- An Ecophysiological Approach to Biomonitoring and Biorecovery*, Springer-Verlag, Berlino 1998.
- [5] Lorenzini, G., Nali, C., *Le Piante e l'Inquinamento dell'Aria*. Springer, Milano 2006.
- [6] APAT, IRSA-CNR, *Metodi Analitici per le Acque. 9010. Indice Biotico Esteso (I.B.E.)*, Manuali e Linee Guida, Roma 2003.
- [7] ISPRA, I.F.F. 2007 - *Indice di Funzionalità Fluviale*. Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, Roma 2007.
- [8] Biagini, B., Barbuto M., Zullini, A., *Bioindicatori della qualità del suolo*. *Biologia Ambientale* 20(2):19-41, 2006.