

NEUTRINI SOLARI • CHIMICA ULTRAVELOCE • MUSCHI E AMBIENTE

3.109

LE SCIENZE

edizione italiana di
SCIENTIFIC
AMERICAN

www.lescienze.it

Dall'influenza aviaria alla polmonite atipica,
il rischio di un'epidemia globale

I nuovi virus

Le più antiche
tracce di vita

Grid: il sogno
dell'informatica
distribuita



maggio 2003

sommario

gli articoli

32 LA MINACCIA DEI NUOVI VIRUS

ROBERT G. WEBSTER ed ELIZABETH JANE WALKER

La prospettiva di una pandemia che potrebbe uccidere buona parte della popolazione umana è tutt'altro che improbabile

40 LA PAURA CHE VIENE DALLA CINA

JEAN-LOUIS VILDE

L'epidemia di sindrome respiratoria acuta e severa sta scatenando timori in tutto il mondo; ecco come ci si sta organizzando per cercare di limitare il contagio

46 Le più antiche tracce di vita

SARAH SIMPSON

Recentissime scoperte impongono di riconsiderare i criteri per stabilire la presenza di forme di vita nelle rocce più antiche della Terra e del sistema solare

54 Risolto il problema dei neutrini solari

ARTHUR B. McDONALD, JOSHUA R. KLEIN e DAVID L. WARK

Il Sudbury Neutrino Observatory ha posto la parola fine a un mistero trentennale dimostrando finalmente che i neutrini provenienti dal Sole cambiano specie durante il loro viaggio verso la Terra

64 Dove una pillola non arriva

ROBERT LANGER

Come far sì che i farmaci raggiungano il loro bersaglio

72 Il trasporto globale delle polveri

DALE W. GRIFFIN, CHRISTINA A. KELLOGG, VIRGINIA H. GARRISON ed EUGENE A. SHINN

Un fiume intercontinentale di polveri, microrganismi

e composti chimici tossici scorre incessantemente attraverso l'atmosfera terrestre

82 Chimica ultraveloce

SALVATORE CALIFANO e PAOLO FOGGI

La rottura e la formazione di legami chimici avvengono in tempi brevissimi, dell'ordine dei 10^{-15} secondi: con la spettroscopia laser ultraveloce è possibile oggi analizzare questi processi

90 Muschi spie dell'ambiente

CARLO MODONESI

Questi semplici vegetali si stanno dimostrando efficaci bioindicatori dell'inquinamento atmosferico da metalli pesanti, idrocarburi, solventi e pesticidi

98 Grid: calcolare senza limiti

IAN FOSTER

Collegando globalmente processori digitali, sistemi di memoria e software, la tecnologia trasformerà il computer da macchina personale a struttura delocalizzata



Questi semplici vegetali si stanno dimostrando efficaci bioindicatori dell'inquinamento atmosferico da metalli pesanti, idrocarburi, solventi e pesticidi

di Carlo Modonesi



Muschi spie dell'ambiente

Il nome latino un po' aulico, *Hypnum cupressiforme*, maschera in realtà una presenza modesta. Sotto l'etichetta tassonomica infatti non c'è un albero imponente, ma un muschio: una pianta a pieno titolo, ma poco evoluta, in formato ridotto, e interamente abbandonata a ciò che di buono e meno buono le arriva dal cielo. La biologia ambientale l'ha però riscattata, scoprendo che la sua semplice organizzazione biologica è uno strumento quasi perfetto per sorvegliare l'inquinamento di origine atmosferica: per qualcuno esso è addirittura il principe dei bioindicatori vegetali. La peculiarità di questa e di altre piante affini, come *Scleropodium purum*, *Hylocomium splendens* o *Pleurozium schreberi*, è il bioaccumulo: un fenomeno ben noto per i suoi effetti ecologici deleteri, che riflette la capacità di alcune sostanze tossiche di penetrare negli organismi invadendone le strutture biologiche. I tessuti dei muschi hanno la capacità non solo di sopravvivere ad alcuni potenti contaminanti ambientali, ma possono anche immagazzinarli in grande quantità senza dare segni apparenti di sofferenza. Inoltre, l'ampia distribuzione di questi organismi nell'emisfero boreale li rende facilmente utilizzabili come accumulatori naturali in una varietà di habitat e siti differenti: terreni, rocce, tronchi e quant'altro.

Benché tra i muschi vi siano alcune specie acquatiche, in linea generale essi sono adattati a un'esistenza subaerea. In termini di biomassa danno il meglio di se stessi nelle tundre e nei biomi freddi, dove si attestano addirittura ai vertici della produzione primaria. Di fatto però non disdegnano nemmeno i climi mediterranei, nelle cui regioni boschive si riuniscono a formare suggestivi tappeti verdi, spesso molto estesi ma sempre di spessore limitato: i loro fusticini, privi di supporti legnosi, non possono crescere molto più di qualche centimetro.

La sistematica tradizionale li cataloga insieme con le epatiche nel gruppo delle briofite, piante contraddistinte da un'architettura alquanto primitiva che prevede un rizoidi per l'ancoraggio a terra, ma che nel contempo difetta di un vero apparato radicale e di un sistema vascolare per gli spostamenti dei fluidi interni. Sul piano delle strategie di vita, questo handicap morfologico esercita un peso notevole, che costringe i muschi a un approvvigionamento idrico e nutritivo rigidamente vincolato alla sedimentazione atmosferica e li priva della possibilità di sfruttare il substrato.

Per stimare la qualità dell'aria, il biologo ambientale di norma fa leva proprio su questo limite strutturale, traducendolo in una proprietà operativa preziosissima. La

CAMPIONAMENTO DI MUSCHI
nei pressi del Centro comune
di ricerca di Ispra in provincia
di Varese. Queste piante
sono ottimi bioindicatori
in quanto possono accumulare
nei propri tessuti, senza venire
danneggiate, grandi quantità
di contaminanti.

Klaus Guggenmos

mananza di un ponte chimico con il terreno, infatti, assicura che nei tessuti dei muschi vengano a depositarsi solo i materiali atmosferici idrosolubili, oppure quelli inclusi negli aerosol o nei particolati, prevenendo la possibilità di una via di ingresso attraverso il suolo. Il fatto riveste un'importanza cruciale dal momento che, malgrado gli agenti chimici più pericolosi siano per lo più antropogenici, può sempre emergere un contributo significativo da parte delle matrici naturali dell'ambiente, spesso sorgenti naturali di elementi tossici biodisponibili. Il suolo, per esempio, in molte regioni è ricco di metalli pesanti perché la roccia madre da cui si origina per pedogenesi ha esattamente quelle caratteristiche geochemiche.

Quando nel biomonitoraggio ambientale si va a caccia di questi specifici elementi, va dunque rispettata la regola di discriminare se essi siano di origine antropica o provengano dal terreno. Ciò permette di avere la certezza che la concentrazione di materiale contaminante misurata nel bioindicatore riflette soltanto il grado di inquinamento dell'aria, oltre che il tempo di esposizione a esso. Grazie agli studi pionieristici di A. Rühling e C. Tyler, padri di questo orientamento scientifico, per alcuni contaminanti è oggi conosciuta la relazione quantitativa tra la concentrazione nei tessuti dei muschi e l'entità della deposizione atmosferica.

Come funziona un bioindicatore

Tipici inquinanti misurabili attraverso il bioaccumulo sono proprio i metalli pesanti, che vengono facilmente intercettati dai muschi, sia per la mancanza di cuticole protettive, sia per l'estesa localizzazione di acidi poliuonici nelle pareti cellulari. Queste molecole contengono siti a carica negativa che agiscono come potenti scambiatori elettrostatici in grado di catturare particelle positive anche a concentrazioni modeste. Per queste e altre peculiarità, alcuni muschi vengono oggi designati fra i sistemi biologici più raccomandabili per la valutazione ambientale di elementi in tracce. Essi consentono inoltre di monitorare gli idrocarburi policiclici aromatici (IPA) e alcuni contaminanti organici persistenti come solventi e pesticidi, che sono rilasciati dall'uomo e quindi non subordinati all'inconveniente di doverne discriminare l'eventuale presenza naturale.

Ma che cos'è un bioindicatore? Esso non è altro che un sistema biologico capace di comunicare un cambiamento nell'ambiente (di norma in senso degenerativo) attraverso una risposta misurabile. In via teorica a questa funzione si candidano organismi molto eterogenei per organizzazione biologica e per ruolo ecologico: una specie autotrofa o eterotrofa, un *taxon* di rango superiore, e perfino l'intera biocenosi di un ecosistema. Va da sé che le risposte utili alla bioindicazione possono essere altrettanto assortite. Semplificando un po', tuttavia, i disturbi chimici dell'habitat consentono di individuare due tipi fondamentali di reazioni a carico degli esseri viventi: reazioni di tolleranza, eventualmente accompagnate da bioaccumulo, e reazioni di sensibilità.

La pianificazione di una strategia di biomonitoraggio è comunque condizionata da una serie di fattori (risorse disponibili, tipologia degli inquinanti, caratteristiche dell'ambiente in cui si opera, obiettivi da raggiungere) che incidono profondamente sulle tecniche operative e i criteri analitici da adottare. I bioindicatori di accumulo rappresentano soltanto una delle strade



IN SINTESI

- I tessuti dei muschi hanno la capacità di tollerare e immagazzinare grandi quantità di alcuni potenti contaminanti ambientali diffusi nell'atmosfera. Ciò li rende bioindicatori ideali in una varietà di habitat differenti, dalle regioni boreali alle aree mediterranee.
- I primi a intuire il ruolo degli indicatori biologici nella ricerca sulla qualità dell'aria sono stati gli scienziati dei paesi nordeuropei, ma anche nell'area mediterranea questo settore della ricerca si sta espandendo. In particolare l'Istituto dell'ambiente del Centro comune di Ispra ha raccolto nell'ultimo decennio una mole considerevole di dati impiegando i muschi.
- Una delle indagini svolte dal Centro di Ispra ha riguardato il Parco nazionale dei Monti Sibillini dove, tramite i muschi, sono state rilevate le concentrazioni dei tradizionali elementi pesanti cadmio, piombo e mercurio, nonché di platino, palladio e rodio, inquinanti di nuova generazione rilasciati dalle marmite catalitiche. Altre indagini ambientali sono state commissionate da varie Province italiane.

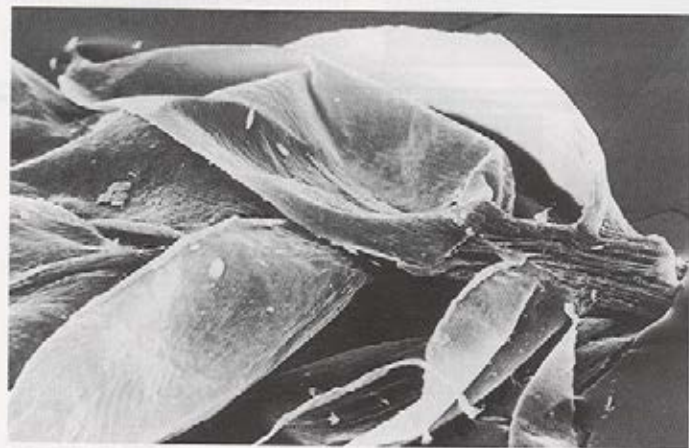
percorribili; anzi, in certi casi può essere utile ricorrere a bioindicatori che danno segnali differenti. Per esempio, per agenti tossici come l'anidride solforosa (SO_2) il controllo ambientale diventa più efficace se si sfruttano le reazioni del secondo tipo. Organismi particolarmente adeguati a questa forma di bioindicazione sono, per esempio, i licheni, mentre la valutazione ambientale si basa sulla verifica della loro abbondanza nell'area di studio. Tradizionalmente i licheni sono stati adoperati per la definizione di indici di purezza dell'aria in relazione alle tipiche emissioni atmosferiche delle aree antropizzate. Il «deserto lichenico», che caratterizza molti centri urbani, è sintomatico di una situazione limite generata dall'eccessiva concentrazione di a-



PIANTINA DI *HYPNUM CUPRESSIFORME*,
una briofita particolarmente adatta
ad essere utilizzata come bioaccumulatore
in quanto la sua crescita lenta consente
di immagazzinare nei tessuti un'alta
concentrazione di metalli pesanti.

Gian Guido Baldoni (2)

MICROFOTOGRAFIA
di un rametto
di *Hypnum*
cupressiforme.
In mancanza
di un apparato
radicale e di
un sistema di vasi,
sono le minuscole
foglioline a ricavare
dall'atmosfera acqua
e sostanze nutritive.



nidride solforosa, che è notoriamente una sostanza fitotossica.
In altri casi si possono utilizzare bioindicatori di sensibilità
che manifestano alterazioni di loro parti o funzioni, come le nec-
rosi fogliari del tabacco in presenza di inquinamento fotochimico
da ozono.

I progetti italiani

Il merito di aver intuito il ruolo degli indicatori biologici nella
ricerca moderna sulla qualità ambientale deve essere accredi-
tato in larga misura agli scienziati dei paesi nordeuropei. Tutta-
via negli ultimi vent'anni anche nella fascia mediterranea del

PRIMA DI DARE IL VIA AL NUOVO INCENERITORE situato nel Comune di Parona, la Provincia di Pavia ha
chiesto all'Istituto dell'ambiente del CCR di Ispra di monitorare il «livello zero» dell'area dal punto di
vista dei principali contaminanti ambientali. Per farlo sono state identificate 42 stazioni
in cui sono stati raccolti campioni di muschio e di suolo. La tabella riporta i valori riscontrati
nell'area (in milligrammi per chilogrammo) e li mette a confronto con quelli di altre località.

Elementi in tracce nel suolo e nei muschi del Comune di Parona

	Al	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
Medio	5732	1,61	10	19	0,15	10	19	153
Massimo	15907	35,9	40	58	0,71	30	50	502
Minimo	2013	0,31	2	8	0,07	3	6	62
Italia		0,26	2,7	8,9	0,07	1,7	11	42
Trento		0,4	2	18	0,12	7,1	11	53
Camerino		0,6	4,3	6,3	0,06	4,3	6,2	60

Fonte: R. H. Cenci - Centro comune di ricerca - Commissione Europea - Ispra (Va)

Vecchio Continente alcuni enti scientifici si sono fortemente im-
pegnati in questo settore della ricerca. L'Istituto dell'ambiente
del Centro comune di ricerca della Commissione Europea di
Ispra, in provincia di Varese, è certamente uno dei più attivi. Qui
il team diretto dal biologo Roberto Cenci custodisce una mole
considerabile di dati sulla qualità dell'aria ottenuti in oltre un
decennio impiegando proprio i muschi come bioindicatori. Per
sua natura questa istituzione opera ad ampio raggio e in Italia
collabora intensamente con alcune università e altri enti, tra cui
l'Istituto superiore di Sanità e l'APAT (ex ANPA).

L'opera di biomonitoraggio svolta dal Laboratorio di Ispra è
da sempre inserita in una pluralità di progetti, come i recenti
IDA (Indice dell'aria in Italia) e MUVIE (Moss Used to Value In-
cinerator Emissions), per i quali è stata predisposta una rete di
campionamento di oltre 500 stazioni sparse sul territorio nazio-
nale. Per IDA è stata privilegiata la specie *Hypnum cupressiforme*
per la sua abbondante diffusione nella
Penisola, per l'ottima conoscenza del suo
comportamento ecologico e per la sua ten-
denza a formare grandi tappeti compatti che
riducono la possibilità di «effetto suolo» (si
veda più sotto), consentendo la valutazione di
alcune delle più importanti emissioni antro-
pogeniche, come piombo, mercurio, cadmio,
cromo, zinco e così via. In ordine di tempo il
Piemonte è l'ultima Regione italiana per la
quale sono stati analizzati e pubblicati i dati
del progetto IDA, relativi a 11 elementi in
tracce.

Questi studi si stanno dimostrando parti-
colarmente utili per varie ragioni, non ultima
la messa a punto di procedure volte alla de-
terminazione delle deposizioni di metalli pesanti
e dei loro tassi annui. I trend vengono
ricostruiti sulla base della ricaduta effettiva di
ogni contaminante e del relativo rendimento
di assorbimento da parte dei muschi, o fatto-
re di efficienza. I risultati ottenuti esprimono valori di concen-
trazione che discriminano tra origine geochimica e origine an-
tropica di ciascun elemento, fornendo anche i profili temporali
delle ricadute al suolo (fino a 10 anni).

Con la supervisione di Roberto Cenci, inoltre, negli ultimi an-
ni sono stati varati anche studi geograficamente più circoscritti,
ma ugualmente importanti per le caratteristiche degli inquinan-
ti e spesso per il pregio ambientale delle zone tenute sotto osser-
vazione. In genere queste indagini sono fondamentali per due
ragioni: innanzitutto permettono un'attività di biomonitoraggio
in grado di riflettere in maniera molto puntuale la qualità am-
bientale; in secondo luogo, proprio per la loro scala limitata, ac-



Il monitoraggio ambientale mediante bioaccumulo di muschi indigeni segue un rigoroso protocollo durante ogni fase operativa. Il campionamento va effettuato su tappeti di muschio di un'unica specie a distanza di almeno 3 metri dal limite delle chiome degli alberi, per evitare che i muschi ricevano materiali percolanti dal fogliame. In mancanza di tappeti estesi e compatti, è consigliabile prelevare muschi su un'area di 50 metri quadrati.

Il prelievo deve limitarsi alla parte superiore del tappeto, in modo da minimizzare l'effetto suolo. I muschi raccolti vanno puliti dai residui di terriccio, foglie e ogni possibile

materiale estraneo, avendo cura di sigillare ogni campione in un sacchetto di plastica.

In laboratorio il contenuto di ogni sacchetto viene estratto e selezionato privilegiando la parte apicale dei talli, ossia la porzione più fresca delle piante non ancora soggetta a decomposizione, che viene trasferita in cristallizzatori cilindrici in attesa del trattamento analitico. I muschi vanno quindi essiccati per 72 ore in stufa a 40 °C, ossia alla temperatura che riduce al minimo la volatilizzazione di metalli pesanti, mentre una quota viene essiccata a 105 °C per la valutazione del contenuto idrico.

Dopo il trattamento termico i materiali sono macinati in un mulino in agata con corpo a sfere, fino a quando la poltiglia raggiunge una granulometria omogenea inferiore a 125 micrometri. Il macinato viene riposto in contenitore di polietilene e poi nuovamente sottoposto a essiccazione prima di essere definitivamente omogeneizzato. Da ogni campione si separano 200-250 milligrammi di materiale a cui si aggiungono acido nitrico e acqua ossigenata; quindi si predispone un contenitore ermetico per la mineralizzazione in forno a microonde. Dopo il raffreddamento il contenitore viene svuotato sotto cappa aspirante.

celerano gli interventi da proporre in sede politica e amministrativa in previsione di iniziative di gestione ambientale. Discariche, insediamenti industriali, inceneritori, aeroporti e centrali energetiche sono le fonti più comuni di inquinamento che si prestano a indagini di questo tipo. Il progetto MUVIE è una delle iniziative più emblematiche da questo punto di vista, perché riunisce entro un quadro europeo le azioni di biomonitoraggio svolte localmente da molti paesi per controllare gli inceneritori.

Quando l'obiettivo è stabilire l'impatto chimico di uno qualsiasi di questi impianti, il primo passo da fare è fissare la concentrazione ambientale degli agenti tossici al tempo zero, ossia i valori di riferimento con cui confrontare i dati successivi. L'indirizzo attuale di MUVIE raccomanda almeno una campagna pilota di biomonitoraggio prima dell'ubicazione della fonte inquinante.

La salute di un parco

Uno degli studi più recenti e interessanti è stato condotto dall'Istituto dell'ambiente di Ispra in collaborazione con l'Università di Camerino. Esso ha riguardato il Parco nazionale dei Monti Sibillini, dove è stata avvertita l'esigenza di valutare la qualità ambientale del territorio. L'area protetta si estende su 70.000 ettari, tra Marche e Umbria, lungo lo spartiacque appenninico che separa i versanti tirrenico e adriatico del centro della Penisola, abbracciando 17 Comuni. L'impatto antropico locale dovuto alle attività produttive, al traffico e al turismo ha spinto l'Ente Parco a commissionare l'iniziativa di biomonitoraggio in un

quadro più ampio di controllo e conservazione del patrimonio naturalistico e artistico. Per lo studio sono state individuate 22 stazioni di rilevamento nei punti di maggior esposizione alle perturbazioni chimiche.

La ricerca, basata anche in questo caso sull'impiego di muschi indigeni della specie *Hypnum cupressiforme*, è stata realizzata perseguendo due obiettivi paralleli: valutare l'entità di alcune emissioni tradizionali come quelle di cadmio, piombo, mercurio e altri elementi in tracce, e ottenere una misura realistica delle concentrazioni ambientali di platino, palladio e rodio, gli inquinanti di nuova generazione rilasciati dai convertitori catalitici delle automobili. Per ogni stazione, oltre ai campioni di muschio, sono stati raccolti e analizzati anche campioni di terriccio, allo scopo di valutare l'effetto del suolo sulle concentrazioni rilevate nei vegetali. Benché le planticelle tendano ad assorbire materiali di sola origine atmosferica, infatti, non va mai esclusa la possibilità che una quota del particolato depositato sulle foglie derivi dal substrato per semplice sollevamento e ricaduta di particelle del terreno. Il rischio viene scongiurato determinando il livello di significatività dell'apporto inquinante dovuto al terreno, normalizzando le concentrazioni dei vari elementi rispetto a un metallo del suolo come l'alluminio, che ha il vantaggio di avere tenore costante nel suolo, non essendo influenzato dalle attività antropiche.

Il confronto delle concentrazioni misurate nel Parco con i valori riportati dalla letteratura ha consentito di elaborare uno scenario nel complesso rassicurante. In corrispondenza di tutte le



Il materiale a questo punto è pronto per l'analisi chimica dei contaminanti che, in caso di elementi in traccia, viene effettuata con spettrometro ad assorbimento atomico. Si procede poi all'elaborazione quantitativa dei valori di concentrazione ottenuti, solitamente per mezzo di tecniche di analisi multivariata, per verificare eventuali associazioni (positive o negative) fra le deposizioni inquinanti.

Nel caso di indagini su scala geografica significativa, i dati di ciascun contaminante debbono essere inseriti in un software di cartografia computerizzata per consentire la mappatura delle deposizioni atmosferiche.



LE SOMMITÀ delle piantine di muschio provenienti dalle stazioni di rilevamento vengono portate in laboratorio e fatte essiccare (pagina a fronte). Il materiale così trattato viene poi macinato mediante sfere poste all'interno di un «mulino» (in questa pagina in alto a sinistra) fino a quando viene ridotto in granuli omogenei di diametro inferiore a 125 micrometri. Dopo essere stato di nuovo essiccato, e mineralizzato in un forno a microonde (in alto a destra), il materiale è pronto per l'analisi chimica dei contaminanti in traccia, che viene effettuata con spettrometro ad assorbimento atomico (a sinistra).

L'AUTORE

CARLO MODONESI è biologo specializzato in igiene ambientale e giornalista scientifico. Lavora con il gruppo di zoologia ambientale diretto da Vittorio Parisi, presso il Museo di storia naturale dell'Università di Parma. Nell'ambito dello stesso ateneo svolge attività didattica e coordina iniziative di comunicazione e divulgazione delle scienze naturali.

stazioni è stata rilevata una concentrazione media di elementi in tracce (tranne che per lo zinco) inferiore ai valori massimi di cui sono ritenuti non contaminati. Per quanto riguarda platino, palladio e rodio, invece, non è stato possibile il confronto con dati standard, dal momento che non si dispone ancora di valori di riferimento sicuri per tali contaminanti. Gli autori hanno quindi optato per un confronto delle concentrazioni riscontrate nel Parco con due stazioni esterne: una ad alta e una a bassa intensità di traffico. Anche in questo caso i bassi livelli di contaminazione hanno testimoniato la buona qualità dell'ambiente.

Lo stato dell'arte in Europa

In parallelo ai vari progetti nazionali, il Laboratorio di Ispra partecipa a una importante campagna europea di biomonitoraggio, che vede nel Centro di studi ecologici di Bangor, in Inghilterra, il principale collettore di informazioni da sottoporre a elab-

borazione quantitativa. Il piano replica un'iniziativa di rilevamento già realizzata altre due volte in passato (Atmospheric Heavy Metal Deposition in Europe) che punta all'aggiornamento delle deposizioni atmosferiche di 10 metalli pesanti. La rete di controllo consta di circa 10.000 siti di campionamento e coinvolge oltre 30 nazioni.

Per quel che concerne i programmi pregressi di sorveglianza dell'aria in ambito europeo, negli ultimi due decenni l'impiego dei muschi si è dimostrato utile ed efficace quasi ovunque, ma soprattutto in Groenlandia, Svezia e Finlandia, dove esiste una antica vocazione a tali programmi di monitoraggio.

In molti laboratori europei comunque si stanno valutando alcune metodologie standard per un utilizzo ad ampio raggio dei muschi nei vari paesi. Non è raro infatti che nei programmi di biomonitoraggio su vasta scala emergano alcune difficoltà metodologiche che rendono difficile il confronto di dati locali. Il problema è che spesso, lavorando a latitudini diverse, ci si scontra con l'impossibilità di utilizzare specie e protocolli dello stesso tipo. Per esempio, nei climi dell'Europa settentrionale si ottengono informazioni difficilmente comparabili con quelle mediterranee.

Una delle soluzioni più brillanti fra quelle oggi adottate si basa sul prelievo e trasferimento di tappeti di muschi vivi nelle stazioni in cui si intende eseguire il monitoraggio. La tecnica (detta del trapianto), pur un po' macchinosa, ha dato risultati eccellenti nel monitoraggio ambientale, soprattutto con il piombo. Esiti meno incoraggianti sono invece emersi in occasione di indagini



di maggiore estensione geografica e di lungo periodo. Spesso i territori da monitorare presentano condizioni climatiche estreme rispetto a quelle dei muschi trapiantati, il che può compromettere la longevità di queste briofite.

Più praticabile si è dimostrata la cosiddetta procedura *moss bags*, basata sull'esposizione all'aria atmosferica di muschi provenienti da altre regioni essiccati e posti in apposite reticelle nelle aree di studio prive di quel tipo di vegetazione. Anche questa tecnica tuttavia non dà sempre i risultati sperati.

Naturalmente il problema non si pone quando si opera in contesti geografici simili. Si pensi ai biomi in cui i muschi crescono in abbondanza, torbiere o ambienti freddi-umidi dove l'esame comparato del bioaccumulo di contaminanti può essere eseguito utilizzando le specie locali. In certi casi addirittura si può spingere molto all'indietro la datazione delle deposizioni inquinanti, raccogliendo dati su campioni vegetali morti, una tecnica che funziona bene con i muschi del genere *Sphagnum*. I tessuti di queste briofite si conservano per periodi lunghissimi, grazie al rallentamento dei processi di decomposizione dovuto alle basse temperature atmosferiche. In alcune regioni dell'Europa settentrionale, tecniche di carotaggio abbinate a protocolli di radiochimica hanno permesso addirittura di ricostruire l'andamento storico dell'inquinamento prodotto da elementi inorganici (arsenico, piombo, zolfo e altri) e da idrocarburi policiclici aromatici (IPA) e bifenili policlorurati (PCB).

Anche per quanto riguarda i contaminanti radioattivi i muschi si sono dimostrati molto utili. Basti ricordare la tempestiva azione di biomonitoraggio che, all'indomani dell'incidente al reattore di Chernobyl, impegnò diversi esperti italiani ed europei. Essi, pur ridimensionando i timori che un po' ovunque si andavano configurando, confermarono puntualmente l'incalzare della minaccia radioattiva in diverse località del continente europeo, precisando la stretta connessione tra la radiocontaminazione dei suoli e il *fall-out* imputabile all'incidente nucleare ucraino.

Se ancora oggi qualche scettico preferisce mantenersi su posizioni di chiusura rispetto all'uso dei muschi e degli altri sistemi biologici nel monitoraggio ambientale, nella maggioranza dei casi si ritiene che ormai non se ne possa più fare a meno. Nella

IL BORGO DI MONTEFORTINO, all'interno del Parco nazionale dei Monti Sibillini, tra Marche e Umbria. Lo stato di salute di questo parco è stato biomonitorato con muschi indigeni prelevati in 22 stazioni poste nelle località più a rischio d'inquinamento, anche da traffico.

comunità scientifica prevale la convinzione che per determinare uno stato di malattia ambientale non si possa prescindere dalle informazioni trasmesse dalle spie naturali dell'ecosistema. Anche perché i costi del biomonitoraggio sono ragionevoli e i protocolli rispondono bene anche alle sollecitazioni sinergiche dell'inquinamento.

Il problema vero è quello di riuscire a utilizzare queste informazioni in modo corretto, integrandole con quelle, irrinunciabili, del monitoraggio tradizionale. Probabilmente si tratta dell'unico modo per arrivare alla mappatura sempre più precisa delle aree sofferenti, nonché al vero traguardo degli studi di chimica e tossicologia dell'ambiente: prendere coscienza delle implicazioni ecologiche, epidemiologiche e politiche della diffusione dei contaminanti.

BIBLIOGRAFIA

CENCI R. M., *L'utilizzo di muschi indigeni e trapiantati per valutare in micro e macro aree le ricadute al suolo di elementi in tracce: proposte metodologiche*, in *Biomonitoraggio della qualità dell'aria sul territorio nazionale* (Atti), ANPA, serie 2, pp. 241-263, 1999.

CENCI R. M. e ALEFFI M. (a cura), *L'utilizzo delle briofite nel biomonitoraggio ambientale: stato della ricerca in Italia*, EUR 19817 IT, 2001.

CENCI R. M. e altri, *Parco Nazionale dei Monti Sibillini: suoli e muschi indigeni per valutare le ricadute di elementi in tracce*, EUR 19750 IT, 2001.

CENCI R. M. e altri, *Utilizzo di muschi e suoli per valutare le deposizioni atmosferiche di elementi in tracce nella Regione Piemonte*, in *«Biologi italiani»*, XXXIII, n. 1, pp. 61-72, 2001.

DABERGAMI D. e CENCI R. M., *Secondo anno di indagini sul territorio di Castano Primo: esperienza con suoli, muschi e acque*, EUR 20380 IT, 2002.