



ACCADEMIA DEI GEORGOFILI

«GLOBAL CHANGE»

IL VERDE PER LA DIFESA
ED IL RIPRISTINO AMBIENTALE

IL RUOLO DELLA VEGETAZIONE

Firenze, 1994

ACCADEMIA DEI GEORGOFILI



GIORNATE DI STUDIO SUL

«GLOBAL CHANGE»

**IL VERDE PER LA DIFESA
ED IL RIPRISTINO AMBIENTALE**

1^a GIORNATA

IL RUOLO DELLA VEGETAZIONE

**Roma, 15 ottobre 1993
Accademia Nazionale dei Lincei
Palazzo Corsini - Via della Lungara, 10**

Firenze, 1994

Da «I GEORGOFILI. Atti dell'Accademia dei Georgofili». Anno 1993 - Settima Serie -
Vol. XL (169° dall'inizio).
Responsabile redazionale dr. Paolo Nanni.

Indice

ERNESTO CAPANNA	
<i>Saluto dell'Accademia Nazionale dei Lincei</i>	5
FRANCO SCARAMUZZI	
<i>Introduzione</i>	7
GIAMPIERO MARACCHI	
<i>Introduzione</i>	9
VALDO SPINI	
<i>Intervento del Ministro dell'Ambiente</i>	31
MARCO BORGHETTI	
<i>Ecosistemi e cicli della materia</i>	37
AMEDEO ALPI	
<i>Meccanismi fondamentali per la vita delle piante</i>	47
LAURA BACCI	
<i>Struttura delle chiome e parametri ambientali</i>	57
GIACOMO LORENZINI - PAOLO GROSSONI	
<i>Effetti dell'inquinamento atmosferico sulla vegetazione</i>	63
GAETANO ZIPOLI	
<i>Gli effetti della vegetazione sull'atmosfera</i>	91
PAOLO GROSSONI	
<i>Effetti della vegetazione sul rumore</i>	99
RAFFAELLO GIANNINI	
<i>La biodiversità degli ecosistemi</i>	105
GIAMPIERO MARACCHI	
<i>Un modello per valutare gli effetti del «verde» sulle condizioni ambientali</i>	117
FRANCO SCARAMUZZI	
<i>Conclusioni</i>	123
MOZIONE	125
BIBLIOGRAFIA	127

Saluto dell'Accademia Nazionale dei Lincei

Illustri accademici dei Georgofili, signori e signore.

Io sono il Professor Capanna, accademico dei Lincei, e sono qui a rappresentare e a porgere il saluto del Professor Salvini e soprattutto le sue scuse per non poter essere presente in questo giorno, neanche a porgere la sua entusiastica — come possiamo dire — approvazione per questo gemellaggio, per questo meeting tra due accademie antiche, nobili e gloriose. Un abbraccio dall'Accademia dei Lincei all'Accademia dei Georgofili proprio perché questa sorella è stata recentemente e duramente colpita. Quindi, a maggior ragione, noi siamo lietissimi di avere qui la vostra riunione.

L'Accademia dei Lincei è sempre stata molto sensibile ai problemi che saranno oggi dibattuti in questo convegno. L'Accademia dei Lincei ha una sua commissione permanente per lo studio dell'Ambiente, per i problemi legati alla gestione della Natura e delle sue risorse. Quindi, personalmente come biologo, non sono un botanico ma uno zoologo, sono particolarmente sensibile a questi problemi e se voi mi accettate, esaurita questa mia veste ufficiale, mi siederò in mezzo a voi ed ascolterò quello che voi avrete da dire e da insegnarmi.

Con questo mio saluto cedo direttamente la parola al Presidente che, da questo momento in poi, presiederà la riunione.

Ernesto Capanna

Introduzione

I Georgofili, mio tramite, Le esprimono — Prof. Ernesto Capanna — profonda gratitudine e La pregano di manifestare questi sentimenti al Presidente Prof. Giorgio Salvini ed a tutta l'Accademia Nazionale dei Lincei che, con grande sensibilità e comprensione, ha voluto concederci di svolgere nella Sua Sede questa nostra pubblica Adunanza.

Un sentito ringraziamento desidero rivolgere al Ministro Spini che ha accolto il nostro invito ed è riuscito, nonostante i gravosi impegni di Governo, ad essere personalmente qui con noi ed a seguire direttamente almeno una parte dei nostri lavori.

Il vile attentato dinamitardo del 27 maggio a Firenze ha direttamente e duramente colpito la nostra sede accademica. In attesa della ricostruzione, prevista entro due anni, i Georgofili hanno subito ripreso, già dal mese di giugno, le loro pubbliche Adunanze grazie alla cortese ospitalità concessa da numerosi Enti ed Istituzioni.

In questa sede, tanto gloriosa, si svolgerà oggi la prima di una serie di Giornate di studio che approfondiranno i risultati di un programma organico avviato dai Georgofili allo scopo di diffondere una maggiore consapevolezza dell'importanza che il «verde» — cioè le molteplici e complesse funzioni dei vegetali — riveste per la difesa ed il ripristino ambientale.

Per ogni tema l'Accademia ha costituito un Gruppo di lavoro i cui risultati saranno presentati in specifiche Giornate di studio. Entro il 1994, od al massimo entro la primavera del 1995, si potrà così disporre di una serie di pubblicazioni interdisciplinari, che costituiranno la base per ulteriori ap-

profondimenti e ricerche, oltre ad offrire un utile strumento per le iniziative da intraprendere a livello nazionale, regionale e locale.

Le singole prossime Giornate di studio saranno dedicate a temi quali: *Le piante, la regimazione delle acque e i dissesti idrogeologici, Il ruolo della selvicoltura, Il «verde» nei piani urbanistici e territoriali, Il ripristino ambientale e la propagazione di piante pluriennali, La compatibilità delle attività agro-forestali nelle aree protette, La formazione di tecnici specializzati.*

Come meglio evidenzierà il Prof. Maracchi nell'introdurre il programma generale di questi studi, ci troviamo nel mezzo di un «cambiamento globale» e le azioni necessarie per una difesa dell'ambiente nel quale viviamo sono in ritardo.

Gli scopi che la nostra Accademia, molto pragmaticamente, intende raggiungere possono essere ricondotti soprattutto ai tre seguenti:

- 1) redigere e pubblicare un'aggiornata trattazione dei principali temi riguardanti il «verde» così da offrire, in forma sintetica e facilmente accessibile, una più puntuale conoscenza delle problematiche;
- 2) formulare, sui singoli temi, alcune considerazioni in merito alle azioni più opportune da promuovere, anche attraverso una valutazione dei problemi giuridico-amministrativi e quindi legislativi per il conseguimento dei necessari obiettivi;
- 3) valutare le priorità da perseguire nella ricerca scientifica e tecnologica, al fine di utilizzare più proficuamente le risorse disponibili.

L'iniziativa è stata realizzata col Patrocinio della Presidenza del Consiglio dei Ministri e di ben sei Ministeri, tra i più direttamente interessati alle nostre problematiche. Questo evidenzia, già di per sé, una dispersione di competenze tra Dicasteri diversi e forse la necessità di un intervento normativo per ricondurre tutta la vasta e complessa materia ad un punto di riferimento unico a livello nazionale, senza porre limiti alle prerogative dei singoli Ministri, ma senza neppure rinunciare all'indispensabile visione globale del problema.

L'Accademia dei Georgofili, fedele al ruolo che la vide già nei secoli passati elaborare modelli di gestione e di recupero del territorio per incarichi ricevuti anche in altri Paesi europei ed in particolare per la bonifica di terre per la produzione agricola, si impegna oggi ad elaborare ed offrire un contributo qualificato per la difesa ed il ripristino ambientale così come è insito nel significato stesso del termine *Georgofilo*.

Franco Scaramuzzi

Introduzione

Il nostro secolo assiste nel suo ultimo scorcio a fenomeni che hanno la principale caratteristica di essere planetari. Il XIX secolo ha visto nascere, come prodotto di un cambiamento sociale iniziato con la rivoluzione francese, le nazioni basate sulla borghesia imprenditoriale e commerciale. Questo sistema politico sociale, che si è dimostrato vincente sui socialismi totalitari per la sua maggiore rispondenza alle caratteristiche intrinseche dell'uomo, ha trasformato la vita degli uomini con grande rapidità sottomettendo alle ragioni dell'economia e dello sviluppo ogni altro aspetto, non solo della sfera etica ma anche dello spazio fisico.

Giunti così alla fine del secolo possiamo constatare i seguenti mutamenti:

- La popolazione mondiale è passata da 1.5 miliardi circa dell'inizio del secolo ai 5.5 miliardi degli anni 90 di cui il 20% soltanto nei paesi industrializzati.
- La densità è passata da 6.2 abitanti per 100 ha a 40 abitanti per 100 ha.
- Nel 1960 il 30% circa della popolazione mondiale viveva in aree urbane, nel 1990 il 50% vive in aree urbane.
- Nel 1900 venivano emesse dalle attività umane circa 0.5 miliardi di tonnellate di anidride carbonica, nel 1990 siamo a 6 miliardi annui di anidride carbonica emessa a fronte di 84 miliardi di ossigeno all'anno emesso dalle foreste.
- Nel 1925 il consumo mondiale di energia era di 1484 TEC, nel 1975 di 8490 TEC.

* I.A.T.A.-C.N.R./Università di Firenze.

Sono sufficienti queste poche cifre per mettere in evidenza i cambiamenti sostanziali che si sono verificati in questi 100 anni. Tali cambiamenti sono avvenuti sulla base dell'assunto implicito che le risorse naturali, ivi compreso lo spazio, fossero variabili indipendenti dallo sviluppo. Una tesi comoda che certamente corrispondeva allo sviluppo delle attività economiche e dei commerci. In effetti ciò ha permesso, nei paesi industrializzati, di migliorare sostanzialmente il tenore di vita delle popolazioni in termini di autocoscienza, di istruzione, di condizioni fisiche di vita. Altrettanto non si può dire per le popolazioni dei paesi in via di sviluppo che tendono infatti oggi a migrare massicciamente verso l'Europa e gli Stati Uniti.

È comunque evidente che i problemi che si sono via via evidenziati rischiano ora di rendere, in un futuro non molto lontano, assai difficile la vita sul pianeta per tutti; ciò ha una conseguenza dal punto di vista politico, una dal punto di vista economico ed una terza dal punto di vista tecnico scientifico. Dal punto di vista politico, nonostante siano ancora vivi nel mondo focolai di guerra e di incomprensioni, nel futuro non si può non prevedere una strada progressiva verso un governo del mondo. La dimensione infatti planetaria dei problemi, le leggi dell'economia, la necessità di regolare flussi di popoli e di merci, il controllo delle enormi potenzialità belliche richiedono, per la sopravvivenza dell'umanità, che vi sia un'autorità che tenga conto delle infinite interazioni spazio-temporali che avvengono oggi nelle diverse parti del mondo. Questo verrà probabilmente equilibrato dallo svilupparsi di autonomie locali che non corrisponderanno più agli Stati Nazionali nati nell'800 e che già cominciano a delinarsi in Europa come nel caso di fiamminghi e valloni, il caso dei baschi ed in qualche misura nel nostro paese per le sollecitazioni delle Leghe.

D'altra parte la guerra del golfo, che toccava delicati equilibri anche economici, è stata una prima occasione in cui in sostanza le Nazioni Unite hanno assunto questo ruolo di garante internazionale. Se il XIX secolo è stato il secolo della costruzione delle Nazioni, il XX ha messo le basi per costruire un unico grande Stato planetario. In questo Stato planetario, come nei libri di fiction o nei film di James Bond, non vi saranno più contrasti fra nazioni, etnie, religioni ma piuttosto fra le strutture organizzate della società e le strutture organizzate della criminalità. Già ora i collegamenti e l'internazionalizzazione dei traffici della mafia italiana, giapponese, cinese, americana, dei narcos sudamericani comincia a prefigurare quali saranno le forze a confronto nel domani.

Da questo panorama nasce un approccio ai problemi dei processi e dei sistemi che garantiscono la vita sul pianeta, che prende il nome alla fine

degli anni '80 di «Global Change». Con questo termine la comunità scientifica internazionale ha inteso riassumere l'insieme dei fatti che stanno modificando non una parte od un'altra di questo nostro pianeta ma complessivamente il pianeta stesso.

A partire dalla fine degli anni '80 divenne sempre più evidente che l'atmosfera, le acque, il terreno e l'assetto del territorio venivano sempre più modificati dall'azione dell'uomo con l'immissione di sostanze che ne cambiavano i processi fondamentali. Come per molti aspetti delle conoscenze, la valutazione degli effetti di queste attività umane divennero oggetto di dibattito ideologico: i fautori dell'esistenza di tali fenomeni, riuniti spesso in raggruppamenti politici, ed i fautori dell'irrilevanza dell'azione dell'uomo sull'ambiente si sono fronteggiati per un decennio e più in un dibattito sterile. Ciò che interessa è valutare, possibilmente mediante misure e proiezioni, ciò che in realtà sta avvenendo; se questo comporta dei rischi per l'umanità si deve intervenire, se non ne comporta tanto meglio!

Tra gli elementi poi che svolgono un ruolo non secondario nella sensibilizzazione dell'opinione pubblica rispetto a questi problemi si deve includere la stampa che spesso per il gusto dello scoop sensazionale esalta o minimizza tesi e risultati che devono comunque essere sempre trattati con grande cautela ed attenzione. I sostenitori del «Global Change», ed in particolare dell'aspetto concernente l'effetto serra, sostengono le loro tesi mediante dati e confronti con situazioni verificatesi in tempi geologici; gli altri sostengono la capacità di ogni sistema complesso di reagire riportandosi a nuove condizioni di equilibrio. La discussione, devo dire, mi sembra un'esercitazione accademica abbastanza sterile. Non sembrerebbe infatti un approccio razionale risparmiare le spese inerenti la prevenzione degli infortuni adducendo come motivo che il numero di infortuni è assai basso rispetto al numero dei lavoratori!

A nostro avviso è sufficiente che vi sia una benché minima probabilità che certi eventi si verifichino per giustificare sforzi intellettuali e finanziari adeguati.

A testimonianza comunque delle preoccupazioni reali, al di là delle speculazioni che sempre si innestano su ogni tesi, si deve citare un'attenzione internazionale per questi problemi testimoniata dal fatto che molti Governi hanno creato Gruppi di ricerca od Istituzioni ad hoc, cito ad esempio in Europa la Germania, la Francia, la Gran Bretagna, l'Olanda, la Danimarca, la Svezia, la Svizzera, e in America gli Stati Uniti ed il Canada.

Sempre maggiore attenzione viene da organismi sovranazionali come la CEE, i cui programmi ambientali sono cresciuti di dieci volte rispetto ai

primi anni '80. Tra i programmi di ricerca della Direzione generale XII si deve ricordare Environment, che tratta tutti i problemi del Global Change, dai cambiamenti del Clima alla desertificazione, dagli inquinanti nelle acque e nel terreno alle tecnologie industriali per la salvaguardia ambientale. Ma anche nei programmi non specifici sull'ambiente, come Scienza e Tecnologia per lo sviluppo, che tratta la ricerca agricola e medica per i PVS, MAST applicato all'oceanografia ed alle tecnologie marine, Agricoltura e Agroindustria, i temi relativi alla salvaguardia ambientale sono sempre più presenti. Nel prossimo Programma Quadro della Comunità, in fase di approvazione da parte del Parlamento europeo, soltanto il programma sul Global Change vede destinato il 9% circa dei fondi totali destinati a tutte le attività di ricerca.

Le Agenzie delle Nazioni Unite, promotrici della Conferenza di Rio, destinano un 30% complessivo del loro budget annuale a progetti dedicati ad attività concernenti l'ambiente.

Tra gli appuntamenti internazionali che rappresenteranno un punto di riferimento da qui alla fine del secolo la conferenza di Rio organizzata dalle N.U. ha sintetizzato nell'Agenda 21 le azioni necessarie per fare fronte alla modifica globale del pianeta in modo da lasciare alle generazioni che verranno un mondo ancora vivibile. In questo contesto sono state promosse quattro Convenzioni, sul Clima, sulla Desertificazione, sulla Biodiversità e sulle Foreste, che impegnano i paesi delle N.U. che le sottoscrivono ad una serie di azioni in tal senso.

Numerose le Iniziative Intergovernative e non, per lo sviluppo tecnico e scientifico della ricerca su questi temi, in America l'IAI: Inter-American Institute for Global Change, in Asia l'APN: Asia-Pacific Network for Global Change Research, in Europa ENRICH: Environmental Network Research in Global Change, di recente costituito dalla DG XII della CEE e strutturato in una configurazione (Figg. 1 e 2) che lo collega alla maggior parte delle iniziative internazionali.

Tra le iniziative non governative si deve citare l'IGBP: International Geosphere Biosphere Program con il Programma START, l'OSS: Observatoire du Sahara et du Sahel e MEDIAS: Réseau de Recherche Regional pour le bassin Méditerranéen et l'Afrique Subtropical.

L'atmosfera

Un settore in cui l'aspetto globale del problema è evidente, è quello relativo ai cambiamenti indotti nell'atmosfera che, a loro volta, tendono a modifi-

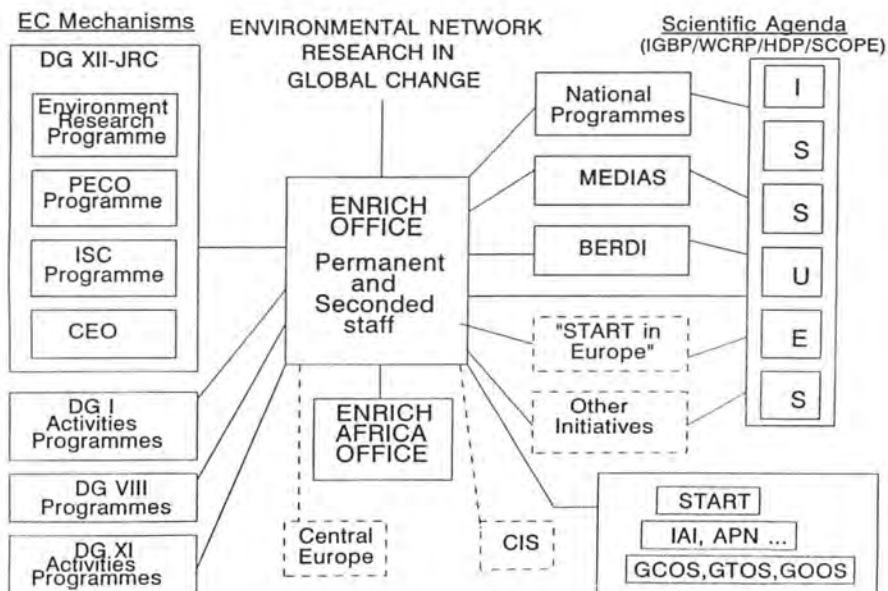


FIG. 1. — Enrich-Environmental Network Research in Global Change.



IGBP International Geosphere-Biosphere Programme
WCRP World Climate Research Programme
WCP World Climate Programme
HDP Human Dimension Programme
SCOPE Scientific Committee on Problems of the Environment
START System for Analysis, Research and Training
GCOS Global Climate Observing System
GTOS Global Terrestrial Observing System
GOOS Global Ocean Observing System
GEMS Global Environmental Monitoring System
HWRP Hydrology and Water Resources Programme
WHYCOS World Hydrological Cycle Observing System
IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change
FCCC Framework Convention on Climate Change

FIG. 2. — Programmi internazionali nel settore del Global Change.

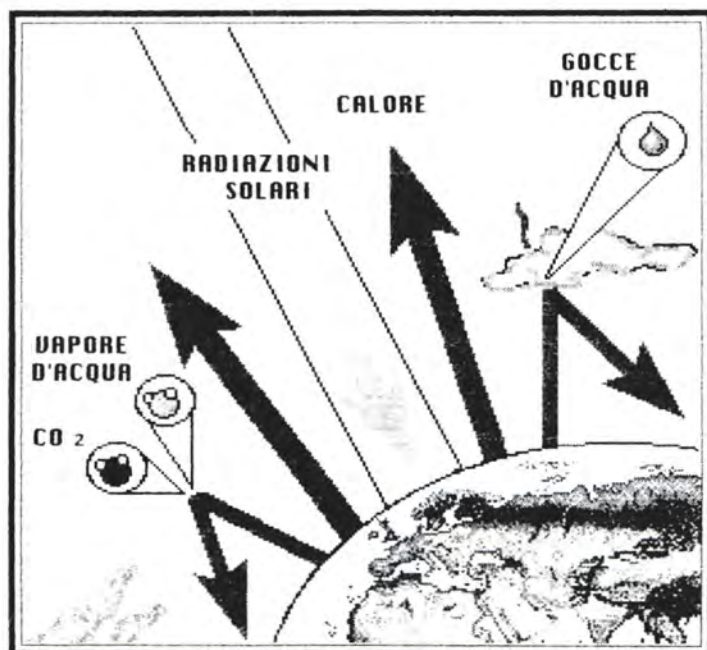


FIG. 3. — Modifica del bilancio radiativo e termico da parte dei gas a «effetto serra».

	CARBON DIOXIDE (CO ₂)	METHANE (CH ₄)	NITROUS OXIDE (N ₂ O)	CHLOROFLUOROCARBONS (CFCs)
"PRE-INDUSTRIAL" CONCENTRATION (mid-1700s)	280ppmv	800ppbv	280ppbv	Nil
1988 CONCENTRATION	351ppmv	1700ppbv	310ppbv	CFC11 = 0.26ppbv CFC12 = 0.44ppbv
RECENT ANNUAL GROWTH RATE (1980-1988)	0.48% per year	17ppbv per year	0.3-0.4% per year	CFC11 = 5% per year CFC12 = 5% per year

FIG. 4. — Concentrazione dei principali gas ad effetto serra (da IPCC).

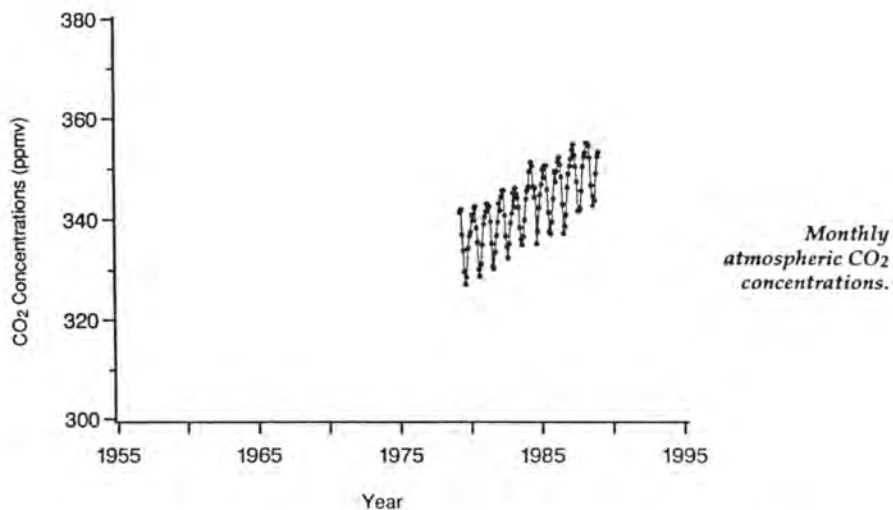


FIG. 5. — Incremento della CO₂ alla stazione di Monte Cimone-Italia (da CDIAC).

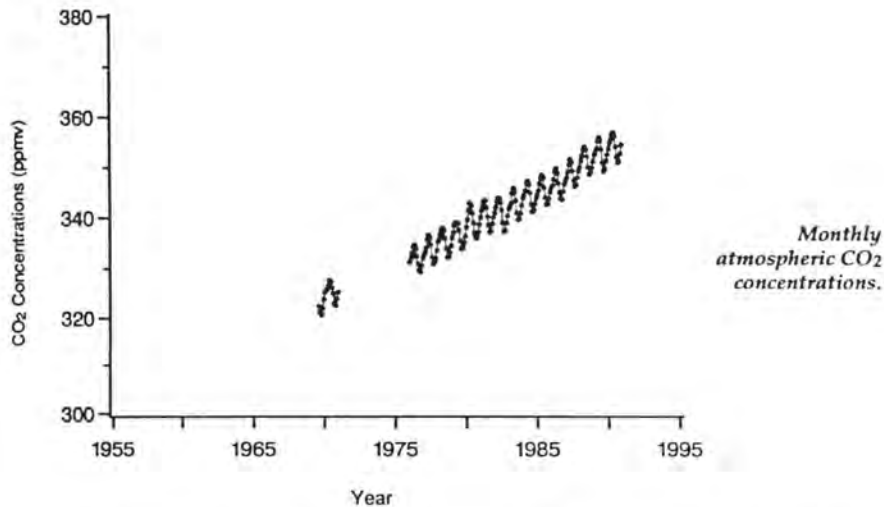


FIG. 6. — Incremento della CO₂ alla stazione di Mauna Loa-Haway (da CDIAC).

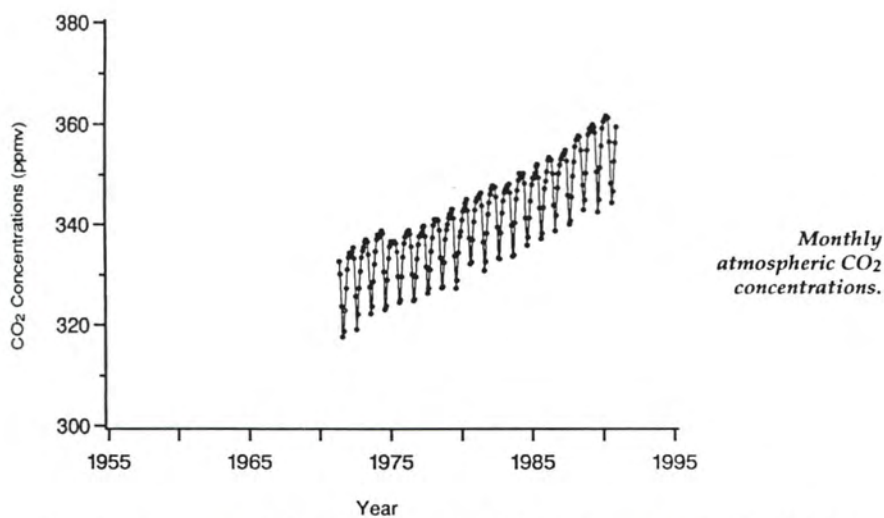


FIG. 7. — Incremento della CO₂ alla stazione di Point Barrow-Alaska (da CDIAC).



FIG. 8. — Aree di anomalie climatiche (CSM-WMO).

care il bilancio energetico terrestre — il cosiddetto effetto serra — con conseguenza ultima il possibile cambiamento della distribuzione dei climi (Fig. 3).

Le combustioni per usi industriali e civili modificano le condizioni dell'atmosfera immettendo composti dello zolfo e anidride carbonica, l'aumento della popolazione mondiale è accompagnato dall'aumento delle superfici a riso e dei ruminanti con un aumento considerevole del metano presente nell'atmosfera, i sistemi di refrigerazione immettono i CFC nell'atmosfera, con conseguente riduzione dell'ozono e modifica dello spettro solare, l'intensificazione dell'agricoltura aumenta i composti dell'azoto presenti nell'atmosfera: nell'insieme dunque la composizione dell'atmosfera si modifica (Fig. 4).

Il primo allarme venne nel 1980 dall'Organizzazione Meteorologica Mondiale nel corso della Prima Conferenza Mondiale sul Clima. Da allora numerose sono state le iniziative per misurare l'entità dei cambiamenti a scala mondiale della composizione dell'atmosfera. Fra le altre si deve citare, come la più completa, la raccolta annua di tutti i dati concernenti le modifiche dei principali gas ad effetto serra contenuti nell'atmosfera effettuata dal Carbon Dioxide Analysis Center dell'Oak Ridge National Laboratory per conto del Dipartimento di Stato per l'Energia degli USA. Il confronto dei dati, raccolti nell'ambito del Programma WMO-BAPMoN, relativi al Monte Cimone in Italia, e della serie di Mauna Loa nelle Haway e di Point Barrow in Alaska (Figg. 5, 6, 7) mette in evidenza cosa significhi «Global»: in ogni punto della superficie terrestre infatti si riscontrano gli stessi valori assoluti ed incrementi di anidride carbonica.

Nel 1990 si tenne a Ginevra la Seconda Conferenza Mondiale sul Clima alla quale vennero presentati i risultati dell'IPCC: International Panel on Climate Change, che tra il 1980 ed il 1990 aveva elaborato i dati e preparato gli scenari possibili in relazione alle modifiche dell'atmosfera. Tali scenari, al di là dei notevoli gradi di incertezza sulle previsioni, mettono comunque in chiaro un fatto certo: in meno di un secolo l'attività dell'uomo ha modificato sostanzialmente la composizione dell'atmosfera introducendo una quantità di gas e di sostanze di cui sono note le caratteristiche fisiche, che modificheranno certamente i processi che danno luogo alla ripartizione dei climi sulla superficie terrestre.

Al di là della discussione già citata sull'entità dell'effetto serra, analizzando la pubblicazione mensile CSM-Climate System Monitoring dell'Organizzazione Meteorologica Mondiale, edita nell'ambito del World Climate Program, che riporta le anomalie climatiche che si verificano in ogni parte del

pianeta, si può mettere in evidenza, da una parte, l'intensificarsi di fenomeni estremi ed un'ampia oscillazione delle fasce climatiche delle medie latitudini dall'altra. La Fig. 8 individua le aree dove le anomalie più rilevanti sono state riscontrate dal CSM nel decennio 70-80. Tali aree corrispondono alla fascia subtropicale delle alte pressioni, area particolarmente delicata per i meccanismi della circolazione generale.

Tali risultati coincidono, per quanto riguarda il Mediterraneo, con quelli delle ricerche effettuate dal CeSIA-Accademia dei Georgofili, nell'ambito del Programma Climatologia della CEE che mettono in evidenza una modifica nella distribuzione delle aree di alta e bassa pressione sul Mediterraneo con conseguenti modifiche, anche sostanziali, nell'andamento delle stagioni ed in particolare sul regime delle precipitazioni (Fig. 9).

Il quadro che ne deriva può essere riassunto in una tendenza alla persistenza dei fenomeni, lunghi periodi di piogge e lunghi periodi asciutti, ad un periodo invernale particolarmente asciutto ed allo spostamento delle piogge verso i primi mesi dell'estate (giugno-luglio) (Fig. 10).

Delle conseguenze di questi cambiamenti e delle azioni necessarie per contenerli ne abbiamo già conseguenze dirette nella vita di ogni giorno. Basti pensare al problema della regolamentazione del traffico urbano per contenere gli scarichi nell'atmosfera secondo gli standard indicati dalla CEE, per rendersi conto di quanto questi fenomeni, che sembrano all'opinione pubblica e purtroppo molto spesso anche a chi ha responsabilità di governo così remoti, siano invece appena dietro l'angolo di casa.

Ciò evidenzia che dietro al termine Global Change si nasconde una filosofia nuova che tende a rivedere forzatamente molti aspetti dello sviluppo di questo secolo.

Le risorse idriche

Le modifiche al regime delle precipitazioni si collegano, peggiorando la situazione laddove queste diminuiscono, all'accresciuta necessità di acqua ed al peggiorare della sua qualità nei paesi ad alta densità di popolazione e intensa industrializzazione.

Infatti lo scarico di tensioattivi e di fosforo contenuti nei detersivi di uso domestico, l'immissione di reflui spesso tossici effettuato dalle industrie, l'azoto, il fosforo ed i pesticidi distribuiti con l'attività agricola nonché le sostanze che vengono dilavate dalle piogge, deteriorano la qualità delle acque con conseguenze sulle condizioni dei mari, in particolare per quanto riguarda

le coste ed i mari chiusi come il Mediterraneo. Si modificano così numerosi processi che vanno dalla biologia marina alla microbiologia del terreno. In Italia siamo passati da un consumo di 20 litri/persona nel 1925 a 250 litri/persona nel 1990 ed in più la qualità dell'acqua tende a peggiorare per gli usi plurimi che ne vengono fatti dal momento in cui cade sul terreno al momento nel quale ritorna al mare.

Vi è dunque un bisogno sempre più crescente di acqua e di acqua di buona qualità. D'altra parte gli aspetti relativi all'acqua devono essere considerati anche in relazione alle modifiche dell'uso del territorio che comportano modifiche nel ciclo dell'acqua, precipitazioni, evaporazione ed evapotraspirazione, ruscellamento superficiale, infiltrazione, rifornimento delle falde e portate dei fiumi. Tali fenomeni dipendenti dal clima ma anche dalla copertura vegetale e quindi dall'agricoltura e dalle opere infrastrutturali, sono parte di quel complesso di processi che contribuiscono al degrado del territorio o «desertificazione».

Negli ultimi anni ad esempio si è assistito in tutto il bacino del Mediterraneo a lunghi inverni asciutti, con conseguenze assai gravi sul rifornimento delle falde, accompagnati da precipitazioni assai intense in periodi ad evapotraspirazione accentuata, che determinano una riduzione nella quantità di acqua immagazzinata nel terreno.

Cambiamenti climatici, uso massiccio dell'acqua, modifiche all'assetto del territorio sono altri aspetti dei cambiamenti globali che fanno prevedere per il futuro nuovi scenari e quindi nuovi problemi da risolvere.

Anche in questo settore si devono ricordare i programmi Comunitari come Environment che trattano il problema della disponibilità di acqua e di degrado del territorio, conseguente all'abbandono od al cattivo uso che se ne fa.

Terreno e territorio

Il terreno rappresenta l'altro dominio che l'eccessivo impatto antropico sta modificando. I problemi connessi con il terreno riguardano un duplice aspetto: il terreno come base per la vita degli ecosistemi ma anche il terreno inteso come spazio disponibile per il loro insediamento, cioè il territorio.

L'esigenza di incrementare i trasporti attraverso le grandi vie di comunicazione, la crescita spesso disordinata dei centri urbani sia per civile abitazione sia per attività industriali e commerciali, le numerose infrastrutture

legate al rifornimento di energia ed alle telecomunicazioni, creano sul territorio una ragnatela spesso disordinata ed invadente che sconvolge gli equilibri di uno spazio che era stato colonizzato dall'uomo nei millenni con cura ed attenzione agli equilibri naturali che si collegavano all'agricoltura.

Il terreno dunque non solo si modifica per le sostanze che vi si immettono ma, inteso come spazio, si riduce nelle aree morfologicamente più accessibili per la concentrazione di insediamenti urbani ed industriali e si degrada nelle aree più disagiate per il completo abbandono.

Il terreno costituisce la sede naturale della vegetazione e di quei processi di decomposizione che chiudono il ciclo naturale degli ecosistemi. Questi processi sono stati profondamente alterati per lo spostamento nel tempo e nello spazio di enormi quantità di materie, le più svariate, e nella loro trasformazione in oggetti con minor degradabilità delle sostanze iniziali. In Italia si stima che la quantità di RSU sia dell'ordine ormai di quasi 1 kg/persona/giorno, il che significa, per una città come Firenze, la necessità di smaltire circa 500 ton/giorno di rifiuti.

Tale problema viene vissuto periodicamente in modo sempre più vistoso dalla popolazione perché è mancato un approccio culturalmente e tecnicamente adeguato, che partendo dalla globalità del problema lo legasse all'insieme dei problemi concernenti la gestione del territorio e gli equilibri ambientali.

D'altra parte la riduzione delle superfici nelle quali i fenomeni naturali del ciclo della vita possono aver luogo, comporta un degrado sempre più marcato dell'ambiente in cui viviamo, sia nelle situazioni locali sia a livello planetario.

Siamo di fronte al fenomeno della «desertificazione» che si verifica laddove le condizioni climatiche e l'azione dell'uomo sinergizzano con conseguente degrado. Nei PVS ed in particolare nell'Africa subtropicale e tropicale questo fenomeno assume dimensioni che destano profonda preoccupazione ed insieme al crescere della popolazione locale fanno prevedere massicci spostamenti dovuti alla penuria alimentare. Le Figg. 11-15 mettono in evidenza alcuni di questi aspetti. Il *thuaireg* (Fig. 11) sdraiato sotto l'acacia sembra ricordare con nostalgia quando questa superficie brulla era un'oasi. Siamo a sud dell'Hoggar in un'area che vede il deserto avanzare di alcune decine di chilometri per lustro. Ma anche più a sud (Figg. 12-13) al confine con la Nigeria l'accresciuta variabilità interannuale delle piogge permette ad anni alterni di coltivare. Le immagini 14 e 15 ottenute elaborando i dati del satellite NOAA mettono in evidenza, su di un paese come il Niger grande 5 volte l'Italia, come in anni successivi caratterizzati

da stagioni delle piogge fortemente differenziate, le superfici coltivate siano diverse.

Ma il fenomeno della desertificazione, seppure con altre modalità e conseguenze, è ben presente anche nel sud dell'Europa. Spesso questi aspetti che riguardano il territorio non vengono esaminati nelle loro molteplici sfaccettature. Le cause di tutto ciò vanno ricercate in una struttura di gestione che trova assolutamente impreparati sia gli amministratori locali sia gli uffici dei Comuni, delle Province, delle Regioni rispetto a problemi che richiedono una visione proiettata nel mondo del futuro e non ancorata ad interessi strettamente locali e spesso particolari.

In questo senso purtroppo anche la scuola a tutti i livelli, ma soprattutto l'Università dove si preparano i docenti di tutti i gradi di istruzione, non ha saputo far fronte in Italia ad un mondo in rapido mutamento, chiusa spesso nei confini degli interessi delle corporazioni, impastoiata da meccanismi anacronistici e fortemente burocratizzati.

Un aspetto in particolare è stato sottovalutato o addirittura completamente ignorato, il ruolo dell'agricoltura non solo come attività produttiva ma anche e forse soprattutto come attività di tutela ambientale. Specialmente nelle zone collinari e montane, che nel nostro Paese costituiscono il 65% circa del territorio nazionale, l'agricoltore avrebbe potuto svolgere un ruolo determinante nell'assetto del territorio attraverso le opere idrauliche diffuse, le opportune lavorazioni, la cura del bosco, la manutenzione delle infrastrutture. Gli enormi costi che annualmente lo Stato si trova ad affrontare, nel 1993 quasi 6000 miliardi di danni dovuti agli allagamenti quasi sempre legati al degrado del territorio, avrebbero consentito di ricompensare gli agricoltori delle zone più difficili dei minori introiti rispetto a quelli delle zone più produttive. In un momento in cui si sta sviluppando la politica dei Parchi che sono indirizzati alla tutela di quelle aree — e sono molte nel nostro paese — nelle quali gli aspetti naturali e l'opera dell'uomo hanno costruito nei millenni un ambiente che rappresenta un patrimonio culturale e naturale insieme, ci auguriamo che la politica di uno sviluppo sostenibile che coniughi le necessità delle popolazioni locali con quelle della tutela ambientale cerchi di recuperare il tempo perduto.

Il ruolo della vegetazione nel Global Change

In questo panorama il ruolo della vegetazione diviene centrale come elemento di incontro fra atmosfera, acqua, terreno e attività umane, l'agricoltura e la selvicoltura.

La vegetazione, essendo capace di trasformare l'energia solare e le sostanze minerali in sostanza organica, è stata l'origine della possibilità della vita sulla terra di organismi come gli animali che hanno inevitabilmente bisogno delle piante per vivere. Dunque ha svolto e svolge un ruolo insostituibile in tutti i grandi cicli ed in particolare in quello dell'anidride carbonica, dell'acqua, dei nutrienti.

L'abbattimento di una parte dell'anidride carbonica che viene immessa nell'atmosfera, il filtraggio delle particelle, il ciclo dei nutrienti, l'interazione con le altre forme di vita come gli insetti ed i microorganismi, il controllo dei topoclimi e dei microclimi favorevoli alla vita dell'uomo e degli animali, può essere fatto solo dalla vegetazione. Basti pensare a titolo di esempio al microclima che si crea all'interno di un bosco, dove la radiazione solare durante i mesi estivi è 1/10 di quella al di sopra della chioma e la temperatura di conseguenza è inferiore di alcuni gradi (3-8°C).

A questi vanno aggiunti gli aspetti estetici e funzionali di interazione con la vita e la psiche dell'uomo. Basti ricordare il ruolo del giardino, come spazio concluso di meraviglie e di piacere nella cultura persiana, in quella araba e poi in quella rinascimentale, nel '700 ed '800 inglese, o ai meravigliosi paesaggi ornati di viti, di olivi e di cipressi, creati dall'agricoltore toscano.

Se la vegetazione contribuisce a regolare i fenomeni del Global Change questi a loro volta influiscono su di essa. È il caso dell'effetto degli inquinanti atmosferici sul bosco (Fig. 16) o l'effetto diretto della CO₂ (Fig. 17). E nel contesto planetario si può pensare anche a profonde trasformazioni dovute alla modifica degli areali delle principali specie coltivate. È il caso dell'olivo il cui areale in uno studio compiuto per la CEE si sposterebbe a nord a seguito dei mutamenti climatici (Figg. 18, 19).

Una risposta dunque ai problemi posti dal «Global Change» viene anche dalla comprensione del ruolo della vegetazione nell'ambito di fenomeni e processi che vanno dalla scala del singolo appezzamento a quello dell'intero pianeta.

Nell'ultimo decennio numerose sono state le attività di ricerca rivolte ad affrontare questi problemi; basti citare il Programma Climatologia ed Ambiente della CEE, il già citato IGBP, il GEMS, Global Environmental Monitoring System dell'UNEP, il WCP, World Climate Program dell'Organizzazione Meteorologica Mondiale, le attuali iniziative come la convenzione sulla desertificazione e quella sulle foreste, che nascono dalla conferenza di Rio sull'Ambiente del 1992.

Conclusioni

Due aspetti credo che emergano da questa sintetica introduzione: a) che il Global Change riguarda tutti gli aspetti del mondo che ci circonda; b) che la scala dei processi non è solo planetaria ma deve essere piuttosto vista come un continuo che va dalla dimensione delle masse d'aria dell'ordine delle migliaia di chilometri al cassonetto delle immondizie che sta all'angolo di casa nostra. La conseguenza di queste premesse è che il Global Change riguarda tutti e non soltanto i governi o gli scienziati. Riguarda tutti nella filosofia di vita, nelle scelte di tutti i giorni, nella crescita di una cultura che sia rispettosa delle risorse.

Nel nostro paese la presa di coscienza di questi problemi da parte del mondo scientifico è stata abbastanza tardiva, nonostante iniziative nazionali come i Programmi Finalizzati del CNR, ma ancora più tardivo è l'impegno governativo nel creare opportuni punti di raccordo delle iniziative italiane e di utilizzazione e disseminazione dei risultati raggiunti.

Un punto centrale è la formazione in ogni livello di scuola, prima per creare una sensibilità a questi problemi, poi per preparare nuove professionalità che siano in grado di operare con competenza e serietà nelle strutture tecniche e nelle professioni che tratteranno questi problemi.

Da queste constatazioni ed esigenze nasce questa iniziativa che non vuole essere soltanto la riproposizione di fatti e di cifre che ormai sono già patrimonio degli organi di informazione, ma piuttosto la sede per discutere concretamente quali iniziative avviare nel settore del monitoraggio, della ricerca, della formazione, della legislazione.

L'Accademia dei Georgofili nella sua storia secolare affrontò per prima i problemi ambientali della bonifica quando questa significava recupero delle terre alla coltivazione e condizione quindi di sviluppo economico e sociale; la bonifica moderna consiste nella definizione di regole e di azioni che permettano di controllare i cambiamenti globali che sono in corso per consentire all'uomo ed agli altri organismi di sopravvivere sul pianeta nel modo migliore possibile. Poiché la base di ogni buon governo è l'analisi di un problema basato sui dati rigorosamente raccolti ed organizzati, un contributo importante che può venire dall'esperienza dell'Accademia è l'organizzazione di un Osservatorio agroambientale che possa raccogliere con continuità tali dati e metterli a disposizione di chi ha per compito di governare. La riflessione cominciata con questa iniziativa vuole essere la risposta dell'Accademia in termini di lungimiranza scientifica e sensibilità culturale.

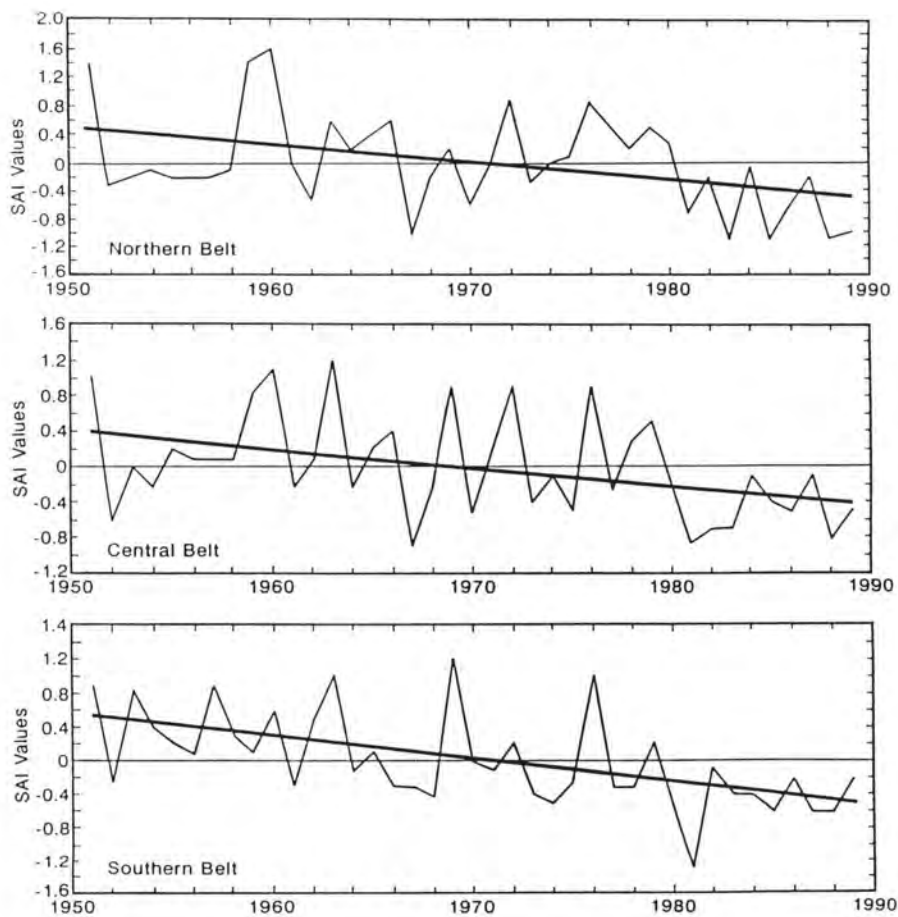


FIG. 9. — Trend dell'indice standard di anomalia per il Mediterraneo (M. Conte e al.).

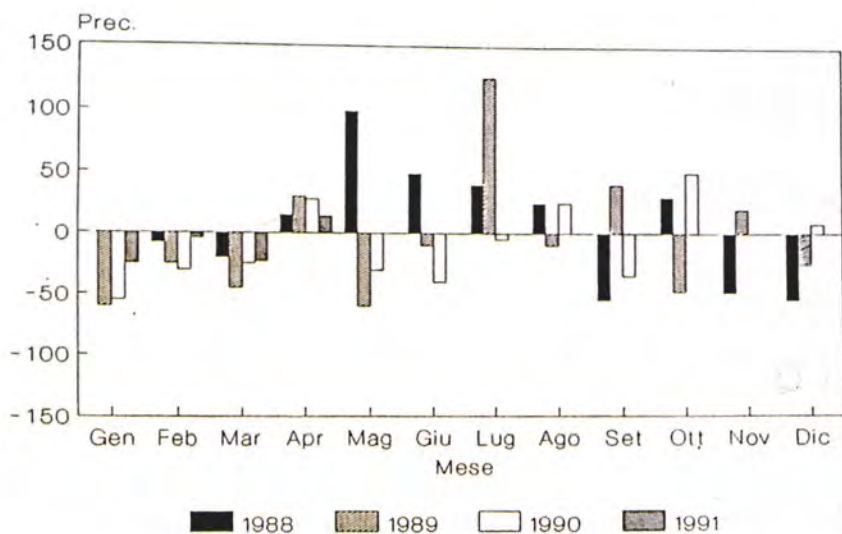


FIG. 10. — Differenze degli anni 88-91 con la media trentennale.



FIG. 11. — Il deserto del Sahara avanza (G. Maracchi).



FIG. 12. — Un anno di siccità nel Sahel (G. Maracchi).



FIG. 13. — Un anno di piogge (G. Maracchi).

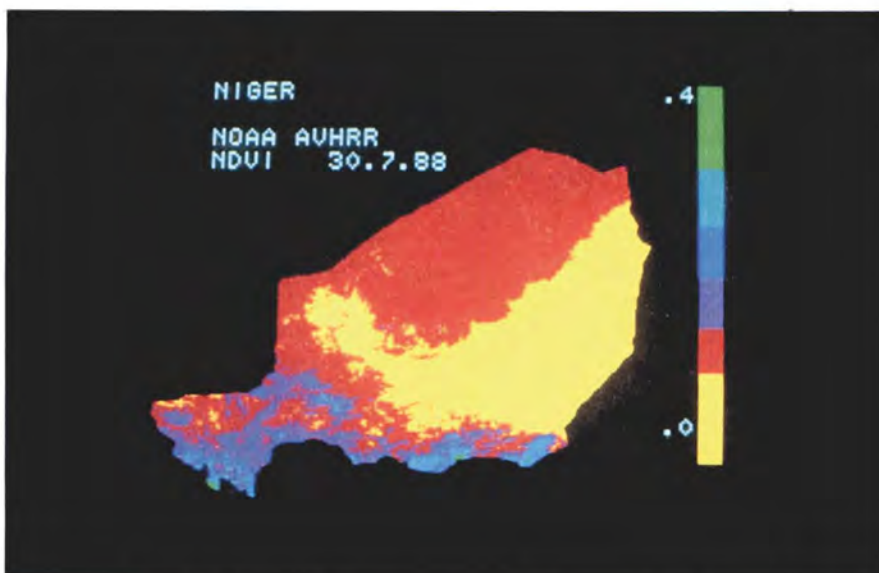


FIG. 14. — Immagine NOAA dell'indice di vegetazione per il 1989.

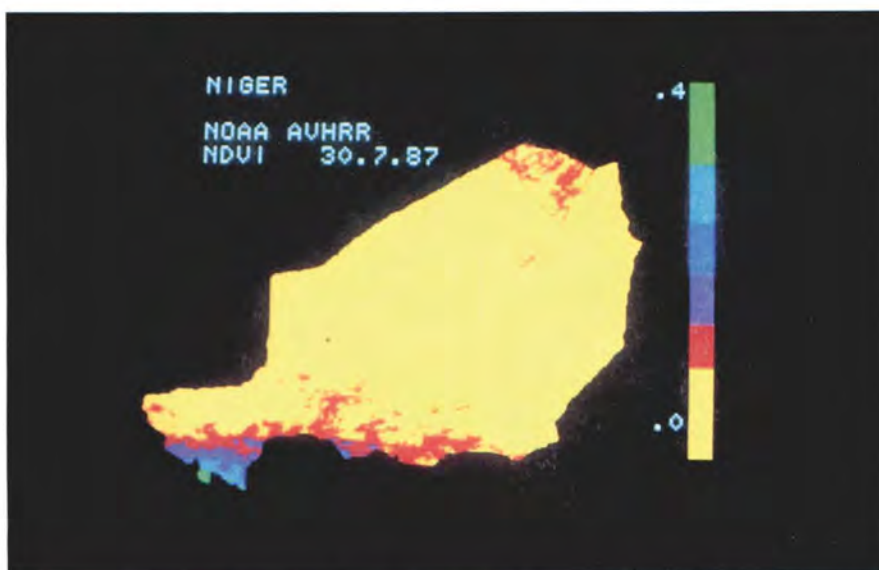


FIG. 15. — Immagine NOAA dell'indice di vegetazione per il 1987.



FIG. 16. — Il parco di S. Rossore - Effetto degli aerosol marini (G. Maracchi).



FIG. 17. — Campioni di soia cresciuti a differenti concentrazioni di CO_2 (da F. Miglietta-A. Raschi).

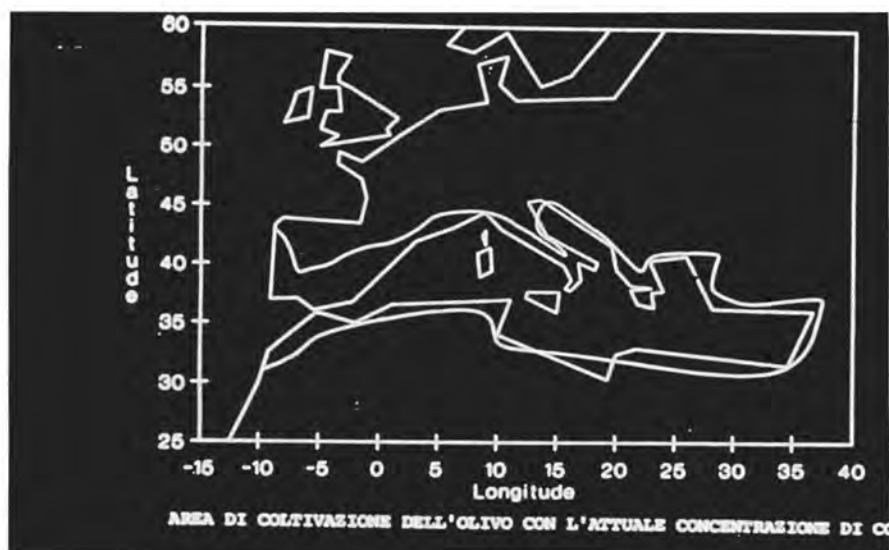


FIG. 18. — Areale attuale dell'olivo (da M. Bindi-G. Maracchi).

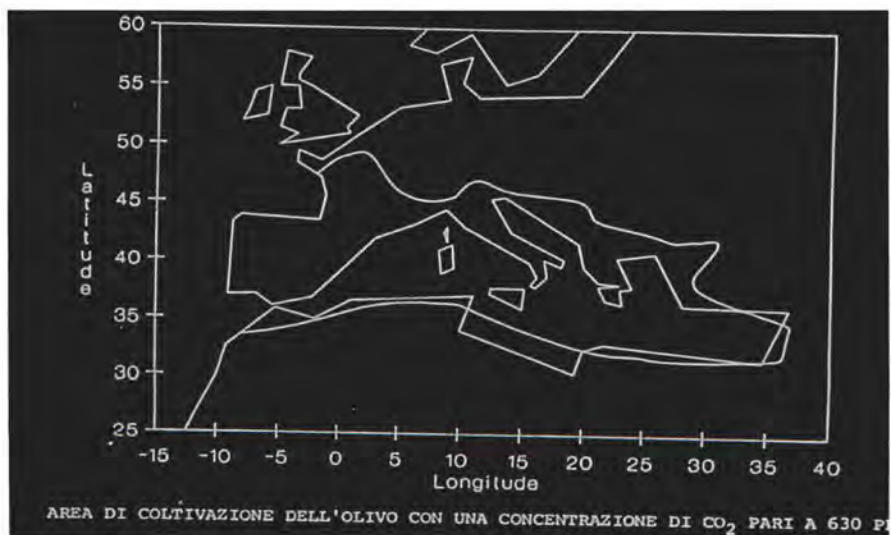


FIG. 19. — Areale previsto in seguito alle modifiche del clima (da M. Bindi-G. Maracchi).

Intervento del Ministro dell'Ambiente

Ho molto apprezzato la relazione di Giampiero Maracchi. Questo segnale di vitalità dei Georgofili ci è particolarmente caro, anche perché abbiamo visto Scaramuzzi vestito da fatica, aggirarsi intorno alle rovine di Via Lambertesca e combattere valorosamente per rilanciare al più presto possibile questa gloriosa istituzione.

Oggi sono stati posti una serie di problemi non soltanto di contenuto ma anche operativi, su cui cercherò di dare al meglio delle risposte, intanto cercando di sottolineare l'importanza del tema «Il verde per la difesa ed il ripristino ambientale», ovvero l'importanza della vegetazione come una delle componenti fondamentali degli ecosistemi naturali e del paesaggio. E, in particolare, il ruolo della vegetazione come vera e propria banca di biodiversità, una banca genetica naturale, come componente essenziale della biosfera, come funzione climatica purificatrice, come funzione regimante protettiva, essenziale componente degli scambi idrici e dell'area idrogeologica per la salvaguardia contro i dissesti. Si potrebbe continuare a lungo: funzione di riqualificazione ambientale, ornamentale, naturalistica, arredi verdi, rimboschimenti, barriera visiva o barriera fonica, barriera frangivento, funzione pedogenetica, rigeneratrice dei suoli, funzione produttivistica, stock di risorse rinnovabili — il legno, con tutti i suoi usi — memoria storica dell'evoluzione storica del paesaggio, per non dire anche una funzione ricreativa e turistica.

Sono talmente numerose le funzioni della vegetazione che sembra paradossale il fatto che, per moltissimi anni, l'Umanità si sia comportata nei confronti della vegetazione come se avesse a che fare con un ostacolo da rimuovere o con un oggetto passivo da utilizzare a proprio piacimento. Tutto questo

oggi non è più possibile e non lo è soprattutto a livello planetario. Direi che l'Ambientalismo è entrato in contatto con la Scienza, è diventato fatto scientifico e, viceversa, la Scienza costringe ad essere ambientalisti, proprio per lo studio di questi macrofenomeni che stanno riguardando il nostro pianeta.

In questa direzione non ci sono alternative: o ci si crede o non ci si crede. Se si crede all'esistenza di questi fenomeni, bisognerebbe anche porre rimedio. Ciò che è sorprendente è che da un lato si afferma di credere all'importanza di questi fenomeni, dall'altro lato si fa ancora molto poco per contrastarli.

Personalmente ho voluto portare almeno una prova cartolare del mio interesse verso questi temi e cioè la pubblicazione di un convegno su «La foresta minacciata» — fra l'altro c'è proprio un intervento di Giampiero Maracchi — che facemmo in collaborazione con l'ambasciatore svedese Ola Ullsten, che è un esperto della F.A.O. di foreste tropicali contro la distruzione delle foreste. Vorrei consegnare questo volume proprio all'Accademia dei Georgofili ed al suo Presidente Scaramuzzi, come dimostrazione di un interesse che, già precedentemente a questa carica, avevamo.

Certamente, credo che dobbiamo in questa direzione accelerare la nostra azione.

Il Cambiamento Globale (il Global Change): l'Italia deve presentare un documento entro questo dicembre. Questo documento è affidato alla supervisione, già prima del mio ingresso al Ministero per l'Ambiente, di un diplomatico in pensione — forse molti di voi lo conosceranno — Giulio Garaguso. Io farò immediatamente qualcosa, e cioè stabilire un contatto fra la commissione che si occupa di questo rapporto sul Global Change e l'Accademia dei Georgofili. Ma — e qui viene posto giustamente un problema di coordinamento — vi sono molti altri impegni che si muovono sullo stesso terreno. Innanzitutto vi è il tema dell'Agenda 21, l'insieme di quelle convenzioni riportate nello schema di cui parlava prima Maracchi: due convenzioni sono state effettivamente formulate e sono in via di ratifica da parte del nostro paese, cioè i mutamenti climatici e la biodiversità. Ormai ambedue hanno avuto l'approvazione da parte di una delle due Camere e stanno andando alla seconda. Premeremo perché si faccia alla svelta.

Ma forse voi avete visto che in queste settimane il Ministero dell'Ambiente ha lavorato duramente per riprendere il terreno perduto. La Convenzione sui mutamenti climatici sarà anche oggetto di un seminario, che si terrà nel novembre a Firenze, mentre per l'Agenda 21, il direttore generale dell'informazione ambientale, l'architetto Costanza Pera, sta lavorando per pro-

muovere la nostra partecipazione. Solleciterò tutti questi organismi a confrontarsi con voi.

A livello di governo indubbiamente manca un'interfaccia unitaria. Allora noi abbiamo proposto al Presidente del Consiglio Ciampi una sorta di comitato interministeriale per l'adempimento degli obblighi italiani sul piano internazionale in rapporto all'ambiente. Naturalmente, questo è un periodo in cui si sfooltiscono i ministeri, i comitati si aboliscono, quindi, questa idea di un comitato in più sarà vista con diffidenza. Che cosa abbiamo ottenuto? Abbiamo ottenuto che il C.I.P.E., già esistente per la Programmazione Economica, possa diventare l'organo in cui vengano trattati, a livello interministeriale, questi temi. Forte delle scadenze che abbiamo di fronte, chiederò nuovamente una formale convocazione, proprio perché solo se mettiamo insieme una serie di ministeri — pensiamo al problema del CO₂: non si può prescindere dal Ministero dell'Industria, dal Ministero della Ricerca — saremo in grado di concretizzare questo impegno italiano sui problemi dei grandi mutamenti climatici.

Aggiungo che fra le funzioni che ho trovato non coperte nel mio ministero vi è quella del Responsabile dell'Ufficio Studi! Questo ruolo è vuoto, ma lo coprirò nei prossimi giorni. E così pure avete visto che ho inviato alle due commissioni ambiente della Camera e del Senato e alla commissione Stato-Regioni, così come vuole la Legge 305 dell'88, il Piano triennale per l'Ambiente. In esso vi sono anche gli stanziamenti per la ricerca che, cercando di innovare — perché ciascuno di noi cerca di innovare rispetto al passato — ho pensato di dirigere verso accordi di programma con le grandi istituzioni di ricerca del nostro Paese piuttosto che dividerli in vari istituti e varie università. Ho già fatto un primo accordo — che andrà reso operativo — sia col C.N.R. che con l'E.N.E.A.

Voi sapete che questo Piano Triennale per l'Ambiente — il mio, di fatto, è per il 94-96 — sarà il secondo dopo l'unico altro piano elaborato, cioè quello per l'89-91. Ho potuto avere un po' di soldi, nonostante il brutto clima dal punto di vista della finanza pubblica, perché ho trovato un cospicuo ammontare di residui passivi non spesi. Il primo stanziamento di cui posso usufruire sono 1.200 miliardi che giacciono lì, e che nel '93 andrebbero ad altri enti, se non avessimo fatto questo Piano Triennale. Credo che questo vi faccia avere un'idea di come effettivamente il ministro dell'Ambiente stia lavorando di gran lena per riuscire a rimettere insieme tutti questi impegni, che si erano via via un po' sfilacciati.

Gli impegni internazionali sono di grande rilievo per quanto riguarda l'Italia, perché è indubbio che nel club dei ministri dell'Ambiente si conta

se si ha alle spalle un Paese che sta effettivamente ratificando, che sta facendo ciò che deve fare sul piano della politica internazionale. Voi parlate di vegetazione, e da questo punto di vista non vorrei trascurare di dire che la Convenzione delle Biodiversità, che è un'altra convenzione di grande rilievo — tra l'altro è finanziata con 700 milioni —, deve passare al traguardo il più presto possibile. La biodiversità la si salvaguardia naturalmente dappertutto, ma la si salvaguardia in particolare nei parchi e nelle aree protette. Anche qui c'è stata una piccola svolta nell'attività del ministero. Mi ero trovato di fronte ad una legge quadro del '91 che aveva istituito 12 nuovi parchi. Ma come? Mettendo dei divieti, mettendo dei controlli, dicendo: «In questi posti non si caccia, non si pesca, non si fa la legna» e così via, ponendo cioè delle giustificate servitù sulle popolazioni. Solo che poi ci si era dimenticati di costituire gli enti parco, cioè di dare l'aspetto positivo: le visite degli studenti, lo sviluppo dell'artigianato tipico, lo sviluppo della cultura legata al parco e, naturalmente, lo sviluppo e la protezione della flora e della fauna in primo luogo. Anche qui, con grande fatica, ho costituito e insediato, il 10 settembre, il Comitato di Gestione delle Dolomiti Bellunesi. Se il Consiglio dei Ministri non mi costringe ad un piccolo spostamento, martedì mattina insiederò quello dei Monti Sibillini, il 30 quello delle Foreste Casentinesi, e poi aggredirò il problema del Pollino, dell'Aspromonte e di tutti gli altri, che sono più complessi. Complesso è, purtroppo, anche quello dell'Arcipelago toscano, per il quale ci sono varie idee su come dividerlo. Voglio dire questo perché nel frattempo il 1° dicembre verrà varato — già abbiamo stabilito i criteri — il Piano Triennale per i parchi e le aree protette: 180 miliardi che vengono divisi a metà fra parchi nazionali e parchi regionali. Ma anche nel Piano Triennale per l'Ambiente, quello generale, quello che ho mandato ora alle commissioni parlamentari e che verrà alla fine approvato dal C.I.P.E., ho messo un altro stanziamento: propongo di destinare un'ulteriore somma di 414 miliardi a favore dei parchi e delle aree protette. Certo, vanno risolti alcuni conflitti. Vi sono alcune aree dell'Appennino in cui sono contenti di avere il parco, perché o hanno il parco o, francamente, non sanno cosa altro avere. Vi sono invece aree in cui i conflitti sono forti: cosa si fa alla Capraia? Si edifica o non si edifica? Insomma, un conflitto non da poco. Noi, nella misura in cui riusciamo a dimostrare che alla dichiarazione di parco seguono poi interventi in positivo di sviluppo sostenibile, aiutiamo quei luoghi per i quali il parco è veramente l'unica vocazione possibile riuscendo a farci alleate quelle popolazioni. Il parco porta un'attenzione turistica che altrimenti sarebbe impensabile. Inoltre, in quelle aree in cui vi è un conflitto forte fra le varie utilizzazioni del territorio, dimostrare che il parco è qual-

cosa di efficiente è determinante. Voi sapete che in America, negli Stati Uniti, i parchi sono dei veri e propri successi economici. Chi ha fatto questa esperienza sa che, se ha fretta, deve avere la raccomandazione per entrare nel parco, perché c'è un numero chiuso, ci si prenota, tanta e tanta è la gente, tale è il successo che queste iniziative riscuotono. In Italia siamo ancora lontani dal raggiungere questi obiettivi, forse anche perché ci manca una cultura di gestione, fantasia, e cose di questo genere.

Ritengo, quindi, che ci siano veramente molti e molti ambiti di collaborazione con l'Accademia dei Georgofili, che ha organizzato queste giornate, per non parlare certamente dell'Accademia dei Lincei, che ci ospita oggi, e a cui mando un particolare saluto. Credo che questa richiesta che mi viene fatta in modo così pressante dalla relazione di Scaramuzzi, e dall'intervento di Maracchi, cioè di potere avere nel campo della ricerca ambientale un più preciso punto di riferimento, un più preciso interscambio, sia assolutamente giustificata. Anche perché, nel frattempo, ci muoviamo per un'azione sincronizzata col Ministero dell'Università e della Ricerca Scientifica — abbiamo anche costituito una commissione congiunta — perché non c'è dubbio che un'azione del Ministero dell'Ambiente che fosse scollegata da un'azione di questi Ministeri non avrebbe senso.

Ringrazio di questa opportunità che ho avuto di poter partecipare al vostro convegno sul rapporto fra «Global Change» e «Il verde per la difesa ed il ripristino ambientale». Non è facile portare a livello internazionale questi temi. Ogni volta che ci ritroviamo si litiga su questo. Perlomeno Ola Ullsten, aveva proposto una commissione indipendente che sgrossasse il problema: ma nemmeno questo è stato ancora possibile. Noi come Italia abbiamo fatto una proposta che forse potrebbe essere raccolta. Abbiamo detto: prima di riunire tutti i Paesi delle Nazioni Unite perché non organizziamo almeno un confronto diretto, ravvicinato fra i grandi Paesi produttori di legname, tra i 30 Paesi che contano in questo campo? Questo per mettere ciascuno di fronte alle proprie responsabilità e per uscire da contrapposizioni tra Paesi ricchi e Paesi poveri — «voi avete utilizzato le vostre foreste, perché non dobbiamo utilizzarle anche noi?»; «avete fatto peggio di noi e adesso ve la prendete con noi» — che di fatto hanno sempre bloccato i lavori in questa direzione.

Però, se non ce la facciamo, buona parte dei nostri discorsi sul Global Change non avranno strumenti, anche perché anni fa il nostro punto di osservazione era diretto in particolare sulla foresta equatoriale, ed è tuttora certamente lì. Ma la crisi che è sopravvenuta in Russia, in Ucraina, il bisogno di valuta pregiata in quei Paesi, stanno facendo sì che anche da quelle parti

si stia tagliando a velocità davvero impressionante, e anche lì non si è riusciti ancora ad inserire un momento di programmazione, di controllo e di intervento. Quindi, dal punto di vista del contributo della forestazione alla lotta contro i cambiamenti climatici, c'è veramente da lanciare un grido di allarme, anche nelle sedi internazionali proprie. Lo abbiamo fatto del resto nella riunione di New York di giugno della commissione sullo sviluppo sostenibile, ma credo che anche una mobilitazione scientifica, sia nazionale che internazionale, sia veramente necessaria. Questo è un fronte su cui, come dicevo prima, si parla bene ma ancora, purtroppo, si agisce molto, molto male. Non si può da un lato dire al Mondo «guardate che si sta correndo questo e questo pericolo» e dall'altro lato non prendere le decisioni e i provvedimenti, anche di politica economica, opportuni.

Penso e spero che proprio da queste iniziative venga una spinta. Penso e spero che da queste riunioni del C.I.P.E. di carattere ambientale possa scaturire anche un'azione più coordinata e più incisiva dell'intero governo italiano.

In ogni caso, sarà questo l'impegno e la battaglia del ministro dell'Ambiente.

MARCO BORGHETTI*

Ecosistemi e cicli della materia

Energia e materia sono indispensabili per costruire la sostanza vivente. L'energia, che le piante ricevono dal sole e utilizzano con la fotosintesi, è indispensabile per assemblare gli atomi in strutture molecolari ad alto contenuto energetico; gli elementi minerali sono i mattoni necessari per l'edificazione di queste molecole complesse.

All'interno dell'ecosistema i processi di produzione primaria sono quindi fortemente accoppiati alla dinamica degli elementi chimici. Questo stretto accoppiamento si sviluppa nell'ambito del metabolismo degli organismi viventi.

Lo scopo che questa relazione si pone non è quello di svolgere un'analisi minuta del destino e del bilancio dei principali elementi chimici negli ecosistemi o nella biosfera, analisi peraltro disponibile in ogni buon testo di ecologia. Si cercherà invece di porre in luce alcuni degli aspetti peculiari del processo, dando risalto a quei punti che appaiono più rilevanti sotto il profilo applicativo, soprattutto in relazione al ruolo e alla funzionalità della vegetazione nel contesto della moderna civiltà industriale.

Quando si affronta il tema della dinamica della materia nell'ambiente, convenzionalmente si distinguono i trasferimenti di elementi chimici che hanno luogo entro gli ecosistemi (cicli biogeochimici) e quelli che comportano scambi di materia fra gli ecosistemi (cicli geochimici). Si tratta di una distinzione prevalentemente formale, in un certo senso arbitraria, utile per il ragionamento ma che non comporta l'individuazione di compartimenti e processi strettamente separati fra loro.

Le quantità di elementi che vengono trasferite entro gli ecosistemi sono

* Dipartimento di Produzione Vegetale, Università della Basilicata, Potenza.

generalmente alte rispetto alle quantità che sono scambiate fra gli ecosistemi anche se, come si dirà, lo sviluppo industriale ha innescato ingenti processi di scambio di materia fra ecosistemi e addirittura fra biomi diversi, con effetti rilevanti sotto il profilo della funzionalità degli ecosistemi e della loro conservazione.

Cicli entro ecosistemi

Gli studi sulla circolazione della materia all'interno degli ecosistemi (cicli biogeochimici) hanno rappresentato, al pari delle ricerche sulla produttività primaria, uno dei massimi tentativi di caratterizzare in modo sintetico il funzionamento degli ecosistemi.

Il tentativo di individuare in questi processi delle proprietà emergenti dell'ecosistema ha per diverso tempo ispirato la ricerca ecologica. Il Programma Biologico Internazionale (IBP), attivo negli anni '70, deve essere annoverato come una delle fasi più significative di questa tendenza.

Se è vero, tuttavia, che lo studio della struttura trofica dell'ecosistema e della circolazione degli elementi chimici tende a considerare la comunità come un tutt'uno (concezione di Clements, ripresa da Odum e dalla sua scuola), è altrettanto vero che la risposta a domande su come i vari processi si svolgono, e sulla ragione delle differenze che fra una comunità e l'altra si riscontrano, è in gran parte legata alla possibilità di «dissezionare» le proprietà e il comportamento degli organismi e delle popolazioni che edificano la comunità stessa.

A differenza dell'energia che fluendo attraverso le biocenosi progressivamente si degrada, trasformandosi in calore, e non può quindi essere riciclata, la materia tende a circolare inalterata attraverso le comunità dei viventi.

La trentina di elementi chimici che, assemblati nelle molecole organiche, vanno a costituire la biomassa vegetale ed animale, vengono liberati nell'ambiente in seguito a processi di decomposizione (respirazione ecologica) e sono successivamente riutilizzati dagli organismi.

Negli ecosistemi tendono quindi a prevalere strategie di tipo conservativo (del tipo «uso e riuso») nei confronti degli elementi chimici necessari per la vita degli organismi.

Il trasferimento degli elementi nutritivi all'interno della biocenosi è tipicamente un processo a forte controllo biologico, nel senso che le diverse fasi attraverso cui si attua la loro circolazione sono pilotate da processi di natura biotica.

Schematicamente queste fasi riguardano:

- a) l'assorbimento di elementi minerali da parte delle piante;
- b) la distribuzione e lo stoccaggio degli elementi minerali nei tessuti vegetali;
- c) il trasferimento di sostanza organica fra i livelli trofici e la restituzione di biomassa e di elementi nutritivi al suolo;
- d) la decomposizione della biomassa e la liberazione nell'ambiente degli elementi nutritivi.

Durante le prime due fasi (fasi di acquisizione, uso e accumulo) ha luogo un processo di concentrazione degli elementi minerali. Le piante sono in grado, spendendo energia, di concentrare le sostanze nutritive: dalle basse concentrazioni degli elementi nutritivi nell'ambiente (soluzione circolante del suolo) si passa a concentrazioni assai più elevate all'interno dei tessuti vegetali. Una volta assorbiti, gli elementi minerali vengono distribuiti fra i diversi tessuti in relazione alle loro esigenze metaboliche.

Nel corso delle seconde due fasi si assiste al processo di restituzione all'ambiente delle sostanze assorbite e stoccate nella biomassa vivente. La restituzione degli elementi chimici al suolo può avvenire in forma diretta o essere mediata dalla decomposizione della sostanza organica che si è distribuita fra i diversi livelli trofici (produttori, consumatori primari e secondari, ecc.) e che da questi viene, con modalità differenti, restituita al suolo (lettiera).

Un aspetto ancora poco indagato, ma che probabilmente svolge un ruolo importante sotto il profilo della restituzione al suolo di biomassa, è quello che riguarda il turnover della biomassa radicale, in particolar modo di quella costituita dalle radici fini.

La restituzione diretta è dovuta ai fenomeni di lisciviazione degli organi vegetali (foglie, corteccia, radici) ed è determinata dallo scorrimento dell'acqua di pioggia attraverso la vegetazione. La lisciviazione può riguardare sia gli elementi minerali (potassio, sodio e magnesio sono fra quelli più lisciviati) sia la sostanza organica. Gli zuccheri, in particolare, sono soggetti a forte lisciviazione: dopo una pioggia intensa l'appetibilità di molti frutti da parte dei consumatori decresce in seguito alla diminuzione del loro tenore zuccherino.

La lisciviazione operata dalle piogge interessa sia gli elementi che le piante hanno assorbito dal terreno sia quelli che le piante hanno intercettato e che si sono depositati sulle loro superfici esterne (chioma in particolar modo). Data la presenza di numerose sostanze sospese in atmosfera, l'azione di intercettazione della vegetazione è spesso rilevante, soprattutto in ambienti, come quelli urbani e periurbani, dove il carico di inquinamento atmosferico è alto. L'acqua che scorre attraverso le chiome si carica di quantità elevate di ele-

menti chimici che, giunti al suolo, ne possono modificare il chimismo. Chiazze di suolo ad alta acidità sono state spesso osservate alla base degli alberi in conseguenza della lisciviazione della chioma e del fusto.

Le fasi in cui si articolano i cicli biogeochimici sostanzialmente si ripetono nei diversi ambienti, venendo così a rappresentare una sorta di processo unificante sotto l'aspetto della funzionalità ecosistemica.

Molto diverse, tuttavia, sono le modalità e le velocità con cui i singoli processi hanno luogo. La struttura e la composizione della vegetazione, la densità e le diete dei consumatori, le caratteristiche climatiche, la composizione della pedofauna e della pedoflora sono tutti aspetti che fanno grandemente variare i parametri cinetici dei cicli biogeochimici.

Ciò risulta evidente soprattutto per quella fase che deve essere individuata come prevalente sulle altre in termini di effetti sul ciclo degli elementi minerali: la decomposizione della sostanza organica.

Il ruolo dei microrganismi, deputati alla demolizione delle macromolecole organiche, è un ruolo chiave in relazione alla rimessa in circolo degli elementi minerali e l'ecologia microbica costituisce una branca conoscitiva di grande importanza nell'ambito della tematica dei cicli biogeochimici.

Le modificazioni che l'uomo induce nelle variabili fisiche ambientali andrebbero attentamente valutate proprio rispetto agli effetti che si possono determinare a livello delle popolazioni microbiche deputate alla decomposizione.

I diversi tempi — dai pochi giorni della foresta tropicale ai mesi, se non agli anni, della foresta boreale — che nei vari ambienti caratterizzano, a causa delle differenti condizioni ambientali e della diversa attività dei microrganismi, la decomposizione della lettiera, costituiscono un parametro diagnostico e differenziale di grande importanza per valutare il funzionamento degli ecosistemi.

Una delle principali conseguenze della diversa velocità con cui hanno luogo i processi di decomposizione della sostanza organica è che i biomi terrestri differiscono grandemente nella distribuzione delle sostanze nutritive tra sostanza organica vivente e sostanza organica morta. La percentuale di sostanze nutritive presenti nella biomassa vivente aumenta andando dalle regioni polari verso quelle equatoriali. Laddove, infatti, i processi di decomposizione sono molto lenti, come nelle regioni boreali fredde, grandi quantità di elementi chimici si accumulano nella biomassa morta al suolo. Il regime climatico di una foresta tropicale favorisce invece una rapida decomposizione della lettiera e una scarsa quantità di sostanza organica al suolo. Tutto ciò ha effetti molto rilevanti sui processi pedogenetici e, di conseguenza, sull'evoluzione dell'ecosistema.

La corretta valutazione dell'influenza che certi interventi colturali (si pensi ai tagli di maturità o di diradamento nei boschi) possono avere nei confronti del clima «interno» alla copertura vegetale (regimi termici e radiativi, soprattutto), e quindi della decomposizione della biomassa al suolo e della liberazione degli elementi minerali, diventa cruciale per poter prevedere eventi di grande importanza sotto il profilo bio-ecologico e colturale (sviluppo della rinnovazione, della vegetazione del sottobosco, evoluzione del suolo, ecc.).

Negli ecosistemi in cui la componente dominante è rappresentata da quella arborea, una notevole quantità di elementi minerali risulta immagazzinata nella biomassa vivente (tessuti dell'albero). Si tratta di un fatto ecologicamente molto rilevante. Gli elementi stoccati nella biomassa arborea possono infatti essere mobilizzati ed andare incontro ad una ritraslocazione «interna» che reindirizza le risorse minerali dai tessuti vecchi, di accumulo, verso i tessuti in crescita attiva (tessuti meristematici).

L'importanza della ritraslocazione, che può essere considerata come un efficiente modo di reimpiego di una risorsa, è in alcuni casi assai evidente.

La foresta equatoriale vegeta solitamente su suoli poveri e sottili, che frequentemente presentano problemi di fosforo-carenza. Gran parte delle esigenze nutritive dei tessuti meristematici vengono soddisfatte, in questo bioma, da fenomeni di ritraslocazione degli elementi minerali.

La pecceta subalpina, importante costituente della fascia forestale superiore alle nostre latitudini, insiste spesso su suoli di modesto spessore caratterizzati da estesi processi di eluviazione (suoli podsolizzati). Anche in questo caso è presumibile che un'adeguata mobilizzazione delle risorse nutritive presenti nei tessuti dell'albero rivesta grande importanza sotto l'aspetto della nutrizione della pianta.

Se si ripensa alle fasi del ciclo biogeochimico sopra elencate, la ritraslocazione (da alcuni denominata ciclo biochimico) può esser interpretata come uno «shunt» che blocca gli elementi nutritivi all'interno della biomassa vivente. Si tratta di una caratteristica che rappresenta un evidente risparmio da un punto di vista energetico.

Potrebbe risultare significativo il fatto che la ritraslocazione risulti massimizzata in quelle popolazioni che per più tempo di altre si sono sviluppate in ambienti caratterizzati da un basso grado di disturbo. Rendendo molto efficace questo processo, così come l'assunzione di elementi chimici direttamente dall'atmosfera, queste popolazioni si sono in parte svincolate dall'aprovvisionamento di sostanze nutritive dal suolo.

Un'adeguata quantificazione dell'entità della ritraslocazione nei sistemi

dominati dalla componente arborea (foreste, impianti per arboricoltura da legno, ecc.) risulterebbe utile per valutare l'opportunità di ricorrere o meno ad apporti di elementi nutritivi e, in ogni caso, per meglio modularli. Si ricorda, per inciso, che uno degli obiettivi della cosiddetta agricoltura «ecologicamente sostenibile» è proprio quello di evitare inutili apporti di energia (sotto forma di lavoro, concimazioni, diserbi) ai sistemi colturali.

L'asportazione della biomassa arborea con le utilizzazioni può compromettere il pool di risorse nutritive a disposizione di un determinato ecosistema. Laddove l'utilizzazione della biomassa legnosa sia condotta con criteri intensivi (asportazione dell'intera biomassa arborea, parti ipogee comprese) la preoccupazione può essere rilevante. Minori pericoli di impoverimento si hanno quando almeno una parte della biomassa viene lasciata *in situ* (ramaglia, corteccia, radici), come succede nel caso delle utilizzazioni tradizionali. Fra l'altro è proprio in queste parti della pianta che gli elementi nutritivi sono presenti a concentrazione maggiore.

Detto questo, una valutazione globale dell'impatto che certi interventi colturali e di utilizzazione hanno su quella importante variabile di stato del sistema che è rappresentata dal pool di nutrienti a disposizione delle piante, non può non prendere in considerazione processi naturali che, agendo in opposta direzione, sono diretti a mantenere inalterate, o comunque a ripristinare, le caratteristiche del sistema. L'alterazione del substrato litologico tende, ad esempio, ad assicurare la conservazione di un certo tenore di elementi nutritivi nella soluzione circolante del suolo.

In relazione al problema di formulare previsioni attendibili sull'effetto di una manipolazione colturale — in questo caso rappresentata da un'asportazione di biomassa e di sostanze nutritive — sulla funzionalità biogeochimica e sulla conservazione della fertilità del sistema, ci si imbatte in una esigenza ricorrente: quella di conoscere i «rates», cioè la frequenza con cui il disturbo si ripete, il tasso di ripristino che l'ecosistema è in grado di esibire, ecc.

Solo questo genere di conoscenza, ancora poco disponibile per ecosistemi complessi, può consentire di predisporre modelli utilizzabili a fini previsionali e gestionali. Una marcata disarmonia fra un'avanzata concettualizzazione e la carenza di dati sperimentali che consentano di «legare» questa concettualizzazione ad un modello parametrizzabile e verificabile rappresenta ancora un punto debole della ricerca, e non solo di quella sui cicli biogeochimici, condotta su basi ecosistemiche.

Cicli fra ecosistemi

Consistono in processi di importazione e di esportazione di materia da un ecosistema all'altro. Per ogni ecosistema (foresta, prateria, campo coltivato, ecc.) possono essere individuate delle vie che rappresentano degli input e delle vie che costituiscono degli output di elementi nutritivi. È ovvio che le esportazioni da un sistema si traducono in importazioni verso un altro sistema e viceversa.

Rappresentano importanti vie di importazione le precipitazioni e le deposizioni atmosferiche, l'immigrazione di organismi da ecosistemi limitrofi, i processi di fissazione di elementi chimici dall'atmosfera, la degradazione del substrato litologico, gli apporti di sostanze nutritive di origine antropica, ecc.

Sono per contro vie di output le asportazioni in mezzo liquido (deflussi superficiali e profondi) e gassoso (trasporto eolico), l'emigrazione biotica, le raccolte di biomassa operate dall'uomo, le perdite per lisciviazione, ecc.

Soprattutto per gli elementi chimici per i quali lo stato gassoso è quello predominante (carbonio, ossigeno, azoto) la circolazione non è ristretta all'interno di un ecosistema ma coinvolge generalmente ecosistemi differenti.

È soprattutto in questo contesto (cicli degli elementi gassosi) che importanti effetti di compensazione possono svilupparsi fra ecosistemi con diversa struttura e composizione specifica.

Senza scomodare esempi che riguardino processi sulla lunga distanza e sul lungo periodo, e limitandoci invece a casi rilevanti ai fini della tematica di interesse (il ruolo della vegetazione nel contesto della nostra civiltà urbana), sono da considerare come importanti processi di scambio e compensazione gassosa quelli che coinvolgono i movimenti di gas fra ecosistemi caratterizzati da un diverso rapporto fra produttori e consumatori.

Si pensi, ad esempio, ad un parco circoscritto nell'ambito di un agglomerato urbano. Saranno molto importanti, ai fini dell'omeostasi delle caratteristiche atmosferiche, i flussi di anidride carbonica che potranno instaurarsi fra le aree che funzionano da sorgenti di CO_2 (zona urbana) e quelle dove la CO_2 verrà assorbita e ridotta nel corso del processo fotosintetico (zona a parco).

La vegetazione non rappresenta, peraltro, un termine di assorbimento solo per l'anidride carbonica. Sono state infatti dimostrate capacità di assorbimento della vegetazione anche nei confronti dell'anidride solforosa e dell'ammoniaca (per maggiori dettagli si vedano i capitoli sui rapporti fra vegetazione e inquinamento).

Un'attenta valutazione delle potenzialità dei vari sistemi come «sorgenti»

o «termini di assorbimento» dei gas atmosferici può diventare rilevante per una corretta pianificazione ecologica (disposizione nello spazio delle zone a verde, loro caratteristiche, ecc.).

Tuttavia, una caratteristica dei cicli geochimici è che spesso non esiste un bilancio in pareggio fra gli elementi chimici che entrano e quelli che lasciano un certo ecosistema. In altre parole, se un certo elemento viene esportato da un sistema, è spesso molto improbabile assistere ad un suo rientro. Si possono quindi creare, ed è questo un fatto rilevante, degli squilibri che possono diventare sempre più evidenti nel tempo. È il caso di una zona sottoposta a forte erosione dalla quale i deflussi asportino con regolarità elementi nutritivi. Squilibri di questo tipo possono alterare in modo cospicuo le variabili di stato del sistema e condurre ad una riduzione della sua funzionalità.

In molti casi, pertanto, il termine ciclo, che implica un movimento ripetuto della materia secondo un percorso circolare, non si addice a descrivere, perlomeno sul breve e medio periodo, questi processi di scambio.

Si può senz'altro affermare che lo sviluppo della civiltà industriale e i progressi tecnologici hanno grandemente aumentato gli scambi di elementi nutritivi fra gli ecosistemi.

Ne sono chiaro esempio: l'inquinamento atmosferico che comporta liberazione in atmosfera, trasporto e deposizione di elementi chimici a grande distanza; le asportazioni di biomassa dagli agro-ecosistemi; gli apporti di sostanze nutritive effettuati con le concimazioni; l'incremento dell'erosione legata a processi di disboscamento, ecc.

In termini sia ecologici che applicativi gli effetti legati ai processi di scambio di elementi nutritivi fra ecosistemi possono essere diversi, se non contraddittori.

Situazioni positive sotto l'aspetto della produttività dei sistemi, possono diventare fonte di preoccupazione qualora prevalga una valutazione ecologica che tenga conto del destino di tutte le componenti dell'ecosistema.

Processi da considerare come positivi in termini di funzionalità e produttività di un ecosistema possono diventare fattori di alterazione e di instabilità per altri ecosistemi.

Ad esempio, le deposizioni acide sulle comunità vegetali naturali (foreste in particolar modo) sono state al centro negli ultimi anni di grande attenzione da parte degli studiosi, sull'onda della giustificata preoccupazione che questo fenomeno fosse alla base, soprattutto in certe aree geografiche, di un rapido deperimento della foresta. In particolare, l'eventualità che uno stress di natura selettiva possa determinare processi di erosione genetica continua ad essere un'ipotesi temuta.

D'altra parte, in molte aree gli alberi forestali esibiscono accresciuti tassi di accrescimento e ciò potrebbe essere messo in relazione a fenomeni di fertilizzazione azotata (apporto di nitrati con le deposizioni atmosferiche).

Gran parte del dibattito sull'agricoltura eco-compatibile nasce dalla considerazione che i massicci apporti di fertilizzanti agli agro-ecosistemi, fatti per conseguire accresciute produzioni, si traducono in cospicui processi di esportazione di sostanze nutritive in grado di alterare in modo cospicuo gli ecosistemi limitrofi (eutrofizzazione di corsi d'acqua, laghi, ecc.).

In termini generali si può affermare che l'accresciuta capacità, da parte dell'uomo, di innescare processi di scambio di materia fra ecosistemi non è stata accompagnata da una capacità di controllo dei medesimi processi e dalla possibilità di formulare previsioni attendibili sui loro effetti ecologici.

Uno dei motivi di questa carenza è la scarsità di informazioni sugli effetti che certi elementi chimici, agenti sia in modo isolato che in combinazione con altri, possono determinare non solo a livello di singolo organismo ma di popolazioni di organismi (piante, animali, microrganismi).

Il problema di riuscire a formulare previsioni attendibili sulle dinamiche di un certo ecosistema in relazione ad un certo input chimico non può infatti basarsi unicamente sulle variazioni attese del livello di presenza della sostanza ritenuta inquinante. Una corretta valutazione di impatto ambientale dovrebbe comprendere un'attendibile previsione sui cambiamenti attesi a livello delle popolazioni coinvolte dalla variazione abiotica.

Meccanismi fondamentali per la vita delle piante

Lo studio degli effetti del « Global Change » sugli ecosistemi terrestri, che ormai si è imposto all'attenzione della comunità scientifica, può essere affrontato tramite modelli globali certamente utili, ma poco significativi per poter tirare conclusioni a livello locale (regionale o subregionale). Pertanto penso, come suggeriscono molti ricercatori, che debba affiancarsi allo studio per grandi dimensioni, una ricerca mirata a descrivere realtà più piccole, ma altrettanto utili sia per il progresso delle conoscenze circa gli effetti dei mutamenti globali sulla biosfera, che per le indicazioni da dare ai responsabili delle politiche ambientali regionali. D'altra parte è bene tenere presente che le conoscenze che oggi abbiamo sulla fotosintesi, come su molte altre funzioni delle piante, derivano essenzialmente da studi su singoli individui e più spesso su singoli organi. Ciò dipende, in grande misura, dalla relativa facilità di studio dei fenomeni se osservati a livello molto piccolo: è noto che uno scambio gassoso in una foglia si può misurare in pochi minuti, mentre la conoscenza dei flussi di carbonio in un bosco od in una coltivazione arborea può richiedere lunghi anni di indagine.

Per quanto concerne lo specifico ruolo della conoscenza fisiologica degli ecosistemi credo che sia opportuna una valutazione addirittura minuziosa che riguardi singole specie in determinati habitat. Solo così potremo avere informazioni sicure da poter mettere insieme, in modo da ricostruire la complessità della vegetazione studiata che sarà quindi seguita nel suo comportamento globale.

Per quanto sembri superfluo, mi pare che non si possa non ricordare

* Dipartimento di Biologia Pianta Agrarie, Pisa.

come gli studi fisiologici rappresentino solo un contributo al raggiungimento di un obiettivo (la comprensione dei processi legati al clima) che per sua natura, richiede un ampio intervento multidisciplinare ed integrato. Solo così si potranno ottenere buone possibilità di previsione dei comportamenti degli ecosistemi in rapporto ai probabili mutamenti globali.

Per quanto concerne gli aspetti fisiologici che devono essere trattati, il «Global Change» pone alcuni elementi di rilievo: a) negli ultimi 300 anni l'aumento in CO_2 , oltre che in altri gas, è stato notevole; dal livello di 250-290 ppm del periodo coincidente con la Rivoluzione industriale, si è raggiunto l'attuale concentrazione di 350 ppm; al momento l'incremento annuo è di 1,4 ppm. Le proiezioni indicano perciò un valore di 660 ppm per la metà del prossimo secolo; b) esiste una correlazione positiva tra aumento in CO_2 e temperatura; è il cosiddetto «effetto serra» che comporta, come principale evento, modifiche climatiche (un aumento delle medie generali che se è di 1°C all'equatore può essere di 6°C ai poli); la CO_2 è il gas atmosferico che, più di altri, ha subito, nel tempo, grandi variazioni.

Attualmente, considerando la quantità di Carbonio di origine fossile che viene riversato nell'atmosfera, si dovrebbe avere un incremento annuo di 2-3 ppm di CO_2 . In realtà parte di questa CO_2 viene rifissata, principalmente però dagli ecosistemi naturali più che dalle coltivazioni ed in particolare dalle foreste pluviali; sappiamo purtroppo che quest'ultime sono in costante, rapida e drammatica diminuzione.

Anche una rapida considerazione sui precedenti punti è sufficiente per comprendere che l'aspetto dei mutamenti globali sulla biosfera comporta, per la vegetazione, non solo dei riflessi immediati sulla fotosintesi e respirazione degli organismi, ma anche nel rapporto interattivo tra ciclo idrologico e pianta e sull'uso agrario (ma non solo agrario) del territorio. Pertanto divengono prioritari, a livello regionale, le seguenti acquisizioni:

- 1 — la radiazione utile per la fotosintesi ed i cicli idrologici.
- 2 — le variazioni indotte nella fisiologia degli ecosistemi vegetali.
- 3 — le variazioni indotte nella struttura degli ecosistemi vegetali.
- 4 — le conseguenze a livello agro-forestale.

D'altra parte sarà il caso di ricordare, almeno una volta, che la vegetazione è il bersaglio diretto di ogni modifica ambientale in quanto gli effetti sull'uomo, ma anche sulla fauna, sono effetti principalmente indiretti. Infatti questi effetti sono legati alle modifiche sulle funzioni e la struttura dei vegetali, modifiche che provocano nuovi rapporti tra le specie, incidendo perciò sul volume della produzione primaria. In questo senso ciò che più ci interessa è la conoscenza di quelle specie che, più di altre, mostrano caratteristiche

di adattamento tali da renderle utilizzabili sia dal punto di vista economico che ambientale (es.: qualità tali da contenere le erosioni dei suoli, facilità a formare ecosistemi naturali, adattabilità alla vita della fauna, pregio decorativo nelle condizioni poste dal «nuovo clima» etc.).

Naturalmente la rete di fattori interconnessi in queste problematiche è molto estesa e complessa. Uno degli esempi che più di sovente viene riportato è quello relativo al rapporto tra aumento in CO_2 ed aumento in biomassa vegetale. Questo può portare ad un aumento della lettiera e dell'attività di decomposizione che, in certe situazioni, può esaltare la nitrificazione e l'acidificazione del substrato con un eventuale aumento della mobilitazione di metalli pesanti.

Questa complessità dei rapporti organismi/fattori ambientali, insieme alla propensione a costruire modelli interpretativi, fa emergere l'esigenza che accanto al dato biochimico e fisiologico si debba considerare anche un'accurata analisi ecofisiologica altrimenti il rischio è di fare un salto troppo grande tra il dato puntiforme e la pretesa di un suo significato generale.

CO_2 e fotosintesi

Per l'agroecosistema l'elemento principale risulta l'effetto sulla produzione utile e sulla «sostenibilità» delle coltivazioni piuttosto che sulla biomassa o produzione primaria così come considerato a proposito degli ecosistemi vegetali naturali.

Gli esempi possono essere molteplici: un ritardo di fioritura dovuto ad un aumento atmosferico di CO_2 può condurre ad una riduzione della produzione soprattutto se combinato con altre variazioni ambientali. Nel mais, ad esempio, la produzione può essere abbastanza ridotta da un innalzamento termico durante il breve periodo dell'impollinazione; d'altra parte nel frumento la carenza idrica preoccupa, in particolare, in quel brevissimo intervallo di tempo corrispondente alla formazione del polline o, più precisamente, alla meiosi delle cellule madri del polline. In questo caso è la linea maschile ad essere inesorabilmente colpita nonostante lo sviluppo delle antere possa continuare con apparente normalità.

Esistono molte evidenze sperimentali che spiegano come eventuali livelli di CO_2 possono avere un effetto positivo sulle specie coltivate, agendo in modo simile ad una fertilizzazione; tuttavia le condizioni termiche variate possono modificare queste risposte. Infatti temperature più elevate hanno la tendenza ad aumentare di più i ritmi respiratori di quelli fotosintetici

pregiudicando quindi gli effetti positivi sull'assimilazione del carbonio generati dall'aumento di CO_2 . Va cioè identificata, per ogni specie, una «soglia» termica che segna il valore al di sopra del quale le perdite di C respiratorie prevalgono sui guadagni fotosintetici. Sembra pertanto evidente che gli effetti sulla produzione delle piante coltivate siano alquanto differenziati e non limitati a quelli sulla produzione primaria. Ciò vale per tutte le specie allevate siano esse erbacee od arboree da frutto o forestali.

Inoltre, se è vero che le variazioni climatiche si riflettono pesantemente sulle produzioni delle piante coltivate, è anche vero che l'ampiezza di questi effetti dipende dallo stadio di sviluppo della pianta. Purtroppo il controllo ambientale dello sviluppo per molte specie coltivate sia erbacee che arboree è conosciuto solo in misura molto limitata.

Un altro punto molto interessante è il possibile effetto, da parte dell'incremento in CO_2 , sulla partizione degli assimilati verso gli organi che rappresentano la «produzione» utile.

Un elevato tenore di CO_2 può influenzare la fisiologia della fotosintesi in maniera differenziata a seconda che si tratti di specie C_3 o C_4 . Sono le prime infatti a registrare con più facilità la concentrazione atmosferica di CO_2 (350 ppm) come fattore limitante. Le C_3 , in atmosfera ricca di anidride carbonica aumenteranno la loro velocità di fotosintesi, ma l'alta CO_2 può anche ridurre la conduttanza stomatica sino a provocare una migliore efficienza d'uso dell'acqua disponibile e quindi aumentando la possibilità di resistenza delle piante in ambienti caratterizzati da carenza idrica. La riduzione dell'apertura stomatica, che è più forte nelle C_4 che nelle C_3 , è un fenomeno fisiologico che è più influenzato dall'elevata CO_2 rispetto all'aumento della superficie fogliare che, se fosse grande, annullerebbe il vantaggio in termini evapotraspirativi. Nelle C_4 , in particolare, l'aumento di produttività sembra legato all'efficienza d'uso dell'acqua. Gli effetti positivi dell'alto livello di CO_2 sono comunque legati alla disponibilità nel suolo di elementi nutritivi, altrimenti saranno quest'ultimi a costituire il fattore limitante la produzione utile.

Ancora una volta gli stretti rapporti tra i vari processi dell'organismo vegetale ci impediscono di poter considerare gli effetti della CO_2 solo in termini di incremento fotosintetico o di decremento respiratorio (fotorespiratorio), ma, come abbiamo visto, si innesta una «reazione a catena» che conduce a conseguenze a vari livelli tra cui anche a livello di bilancio idrico. A loro volta questi effetti sullo stato idrico possono indurre modifiche del LAI con risvolti sulle altre specie dell'associazione vegetale che si troveranno in differenti condizioni di luce, ecc.

Gli effetti dell'aumento di CO_2 sono diversi a seconda del tipo di coltivazione.

Per le coltivazioni arboree si hanno esperienze, per ragioni intuibili, molto più incomplete e riferite pressoché esclusivamente a plantule e giovani alberi trattati con elevate quantità di CO_2 per settimane od al massimo per alcuni mesi. Si sono osservati incrementi di peso secco, del diametro dello stelo e dell'altezza; la conclusione è che le specie arboree, almeno nelle fasi giovanili, si comportano come le specie erbacee. Negli alberi ormai maturi non si hanno informazioni. Interessanti possono essere gli effetti sull'apparato radicale che diviene più robusto ed incrementa la quantità di H_2O e minerali assorbiti.

La concentrazione in CO_2 influenza anche la distribuzione delle specie all'interno delle cenosi, sia per i meccanismi discriminatori $\text{C}_3\text{-C}_4$ già ricordati, ma anche per altri motivi. Ciò porta ad una possibile modifica dei rapporti infestanti/specie coltivate.

Tra le modifiche è da riportare anche l'epoca di fioritura. Infatti il tempo per raggiungere la piena fioritura viene spesso ridotto dall'aumento di CO_2 ; ma questo comportamento risulta specie-specifico se non addirittura genotipico.

Le piante e la risorsa acqua

La quantità di acqua sul pianeta è enorme ma fissa ed in larghissima percentuale non disponibile per le esigenze idriche delle piante che peraltro sono ingenti. La quantità di acqua direttamente od indirettamente utilizzabile dalla biosfera rappresenta circa lo 0,9% del totale ed è costituita dall'acqua dei laghi e dei corsi d'acqua superficiali. L'acqua dell'atmosfera o contenuta nella biosfera rappresenta una percentuale che, sul piano meramente quantitativo, è trascurabile.

Questo 0,9% di acqua è ovviamente un quantitativo enorme, ma va commisurata alle necessità dell'intera biosfera (uomo incluso) anche in considerazione dell'inquinamento causato dall'uomo ed in misura crescente.

Fortunatamente l'acqua, a differenza di altre risorse, è facilmente riciclabile (secondo il noto ciclo dell'acqua).

Diciamo subito che l'uomo per vivere sul pianeta consuma acqua in larghissima misura. Quando pensiamo ai consumi umani il pensiero va subito alle sue necessità alimentari od ai bisogni domestici; in realtà questi usi comportano quantità relativamente limitate di acqua. Le statistiche ci dicono infatti che ogni americano (per gli U.S.A. questi dati statistici sono più accu-

rati che per altri paesi) consuma mediamente 200 metri cubi di acqua l'anno per le necessità domestiche globali, ma questa quantità è destinata ad aumentare moltissimo se si considera il quantitativo generale di acqua richiesta dal complesso delle attività umane. Il consumo di ogni cittadino statunitense sale allora a 2700 metri cubi all'anno.

Ci possiamo allora chiedere come si ripartisce quest'acqua nelle varie attività ed impariamo alcune interessanti cose. Se consideriamo ad esempio l'attività di raffinazione del petrolio grezzo possiamo scoprire che per ogni tonnellata di benzina prodotta si consumano 20 tonnellate di acqua; nel processo lavorativo siderurgico ogni tonnellata di acciaio ottenuta «costa» duecento tonnellate di acqua; ma la «sorpresa» è rappresentata dalla produzione agraria: per produrre una tonnellata di frumento occorrono alcune migliaia di tonnellate di acqua.

Sono gli agrosistemi dunque a richiedere la gran parte di acqua utilizzata dall'uomo e ciò non sorprende se si pensa alla peculiarità della vita vegetale sia che si esprima negli ecosistemi naturali che nelle colture agrarie (circa il 60% dell'acqua usata dall'uomo è usata in agricoltura).

Sappiamo bene che il quantitativo di acqua assorbito (e quindi, in grandissima parte, rieliminato nell'atmosfera tramite l'evaporazione) è il fenomeno quantitativamente maggioritario della vita delle piante. Si usa dire che un albero è capace di riemettere, durante una giornata estiva, circa metà del suo peso in acqua, attraverso la traspirazione fogliare!!

L'acqua d'altra parte, proprio in virtù di questa estrema dipendenza della vita vegetale da essa, determina le caratteristiche dei vari territori del pianeta attraverso una rigida tipizzazione degli ecosistemi vegetali. È infatti soprattutto la quantità delle precipitazioni che determina la presenza in certe aree del mondo, delle aree palustri (umide) od in contrapposizione dei deserti, oppure delle tundre, delle praterie e delle foreste (e tra queste delle foreste sempreverdi, decidue e pluviali).

Le funzioni dell'acqua nella pianta sono molteplici e, confidiamo, generalmente conosciute. L'importanza della risorsa idrica è tale che gli impianti di irrigazione si sono ampliati a livello mondiale, dalla superficie di 8 miliardi di ettari (più o meno la superficie dell'Austria) del 1800, ai 48 milioni di ettari del 1900, sino a raggiungere i 94 milioni di ettari nel 1950 ed agli attuali 250 milioni di ettari! Un incremento esponenziale che pone, tra gli altri, un serio problema di compatibilità ambientale. È inoltre ben chiaro che per motivi diversi, che variano da ragioni economiche meramente tecniche ed ambientali, le grandi opere (dighe etc.) che hanno reso possibile l'e-

norme ampliamento della disponibilità di acqua, non verranno attuate nel futuro prossimo e meno prossimo.

Ogni anno 3300 chilometri cubi di acqua (sei volte il volume del Mississippi) vengono prelevati da fiumi e pozzi per irrigare le piante coltivate dell'intero pianeta. Per dare un'idea di questo quantitativo basti pensare che le riserve idriche globali potenziali per l'Italia sono di 110 km³. È chiaro che una tale quantità ha di per sé un impatto profondo sui corpi idrici globali: falde acquifere ridotte e contaminate, salinità dei suoli, laghi che si restringono, sommersioni, piene, distruzione di habitat acquatici spesso sono associati all'irrigazione determinando il costo ambientale di questa pratica agraria.

Questi dati, che evidentemente preoccupano, vanno ora considerati anche nella logica delle «Variazioni globali» che, per gli elementi già accennati, potrebbero addirittura peggiorare una situazione già precaria.

I tentativi umani di praticare le prime forme di agricoltura sono stati, molto probabilmente, ostacolati soprattutto dalla siccità. È lecito ritenere che il primo problema ecologico che l'uomo ha dovuto affrontare sia stato quello relativo alla carenza idrica; reperti di lavori d'irrigazione rappresentano gli artefatti più antichi della storia archeologica.

È quindi quanto mai necessario riconsiderare ciò che sappiamo della fisiologia dell'acqua nella pianta per intervenire in maniera appropriata (e responsabile) nei nuovi scenari che si prospettano.

Sappiamo come le piante riescono a difendersi da eventuale carenza di acqua. Esistono piante xerofite, idrofite e mesofite. Forse questa casistica è discutibile perché in ogni ambiente la disponibilità di acqua può essere molto variabile; possiamo allora fissare il concetto di ambiente xerico, quello nel quale il deficit idrico è più frequente.

In questi ambienti si trovano allora piante con maggior spessore cuticolare e maggior resistenza stomatica al passaggio dell'acqua; un maggior rapporto radici/parti aeree; tessuti che conservano acqua come avviene nelle piante cosiddette grasse. Tutti questi espedienti (ed in massimo grado l'appariscente fenomeno delle piante che «risorgono») «evitano» lo stress idrico; molto più rara è una vera resistenza al deficit idrico.

Anzi, spesso, le piante superiori muoiono se sottoposte a deboli deficit idrici; più resistenti sono piante inferiori come muschi e licheni. D'altra parte, molte delle caratteristiche sopra elencate, sono incompatibili con i requisiti che devono possedere le specie coltivate. Impensabile è quindi un miglioramento genetico per tali parametri.

Tutto ciò va considerato alla luce delle variazioni globali.

In tutto l'ecosistema mediterraneo, e quindi anche in Italia, si è già in

condizioni di scarsa disponibilità idrica, pertanto l'acqua disponibile per l'irrigazione sarà sempre meno anche a causa della forte competizione con gli usi «cittadini».

Questa ulteriore flessione di acqua può portare a effetti molto netti sulla dinamica degli ecosistemi. Infatti la disponibilità di acqua può avere influenza sia sulla diversa capacità di utilizzare l'acqua da parte delle diverse specie, sia sul tipo di metabolismo fotosintetico.

I rapporti tra bilancio idrico e fotosintesi sono piuttosto stretti all'interno dello stesso organismo, ma hanno dei forti riflessi anche tra gli organismi diversi di una complessa associazione vegetale. Un aumento di CO_2 , ad esempio, si tradurrebbe in un beneficio per le piante C_3 , mentre la scarsità dell'acqua favorirebbe le C_4 e soprattutto le CAM. Un eventuale studio ecofisiologico del problema idrico dovrebbe pertanto interessare il metabolismo fotosintetico!!

D'altra parte, se dagli ecosistemi naturali si passa a considerare le coltivazioni, si constata la stringente necessità di irrigare sempre meno e quindi esaminare con attenzione crescente le capacità di osmoregolazione, come pure la morfologia, la dimensione e la funzionalità degli apparati radicali, troppo spesso dimenticati dagli studiosi di fisiologia vegetale.

Per gli agroecosistemi risulta comunque più difficile distinguere gli effetti su fotosintesi/respirazione dagli effetti sul bilancio idrico. Le variazioni nella concentrazione di CO_2 di alcuni parametri climatici possono indurre modifiche nel rapporto radici/parti aeree e sul rapporto carbonio/azoto che sono indici così generali da avere ricadute su tutti gli aspetti della vita della pianta.

La capacità delle piante a sopportare lunghi periodi di carenza idrica non è prerogativa di una forma vegetale. Tutte le forme (alberi, arbusti, erbe, muschi, licheni) comprendono specie che si adattano alla siccità ed altre che vogliono molta acqua.

Questa evoluzione di specie tolleranti che si è originata in ogni forma vegetale tende ad essere dimenticata quando si osserva la drammatica variazione di vegetazione nel passaggio da aree con intense e numerose piogge ad aree con scarse precipitazioni.

Soprattutto la scomparsa degli alberi nei deserti sembra un segno di incompatibilità della vegetazione arborea con la bassa umidità; ma questa assenza di alberi è spesso dovuta non tanto a scarsa tolleranza alla siccità ma all'intervento distruttivo degli animali e dell'uomo.

L'umidità interviene in modo determinante più sulla composizione della foresta che sulla forma arborea. Ad esempio nell'ovest della Patagonia le

piogge, che apportano 2500-3800 mm annui, sono necessarie per la lussureggiante vegetazione di quell'area; a soli 60 km di distanza (verso est) si verificano solo 350 mm di pioggia, ma gli alberi vi possono vivere a condizione che gli animali non siano lasciati liberi di brucare in queste aree.

Struttura delle chiome e parametri ambientali

La struttura fisica di una pianta o di un gruppo di piante e il modo in cui essa interagisce con i fattori fisici come l'energia radiante e il movimento dell'aria risulta fondamentale per capire il modo con cui le piante modificano le condizioni atmosferiche per produrre il proprio microclima. La conoscenza di queste interazioni permette di capire le modificazioni, almeno da un punto di vista qualitativo, dovute a cambiamenti come il diradamento, che altera lo spazio tra gli individui e la densità della chioma, la fertilizzazione, che altera la densità della chioma, o l'inquinamento che determina defoliazioni o anormali accrescimenti dei rami, con conseguente modifica della struttura della chioma, o la variazione della densità dello stand in conseguenza alla morte di individui e/o delle specie più sensibili.

Diversi sono i parametri morfologici che possono essere esaminati nell'analisi di questa reciproca interazione: forma, dimensione e struttura della foglia, architettura della pianta (disposizione spaziale delle componenti aeree della pianta e cioè foglie e rami), struttura della copertura vegetale (densità di individui e composizione floristica). Nel caso di piante arboree deve essere inoltre considerata la persistenza dell'apparato fogliare (piante sempreverdi e caducifoglie).

Intercettamento della luce

Le piante possono riflettere, assorbire o trasmettere la radiazione solare incidente sulle loro foglie in modo tale che la luce che giunge al suolo, dopo

* I.A.T.A.-C.N.R., Firenze.

aver attraversato un certo strato di vegetazione, risulta modificata sia nell'intensità che nello spettro. La vegetazione assorbe circa l'85-90% della luce solare incidente, ne riflette il 5-10% e ne trasmette il 5%. Il comportamento delle foglie è però selettivo per le diverse lunghezze d'onda; infatti le foglie posseggono un alto coefficiente di assorbimento nella regione del blu, del rosso e dell'infrarosso lontano, mentre hanno un basso assorbimento nella regione del verde (da qui il colore verde delle foglie) e dell'infrarosso vicino. Per le foglie di molte specie il valore di assorbanza è di circa 0,5 ma può raggiungere un valore di 0,88 negli aghi delle conifere. L'assorbanza nella banda spettrale fotosinteticamente attiva è in media pari a 0,85. Tale parametro è fortemente dipendente dal contenuto in acqua della foglia e dalla presenza di peli sulla sua superficie, come risultato della sua influenza sulla riflettanza. Modifiche delle caratteristiche spettrali delle foglie sono legate anche all'età delle stesse; infatti l'assorbanza aumenta all'aumentare dello spessore durante la crescita in conseguenza ad un incremento del contenuto in clorofilla.

La riflettanza di un gruppo di piante tende ad essere più bassa di quella delle foglie singole che compongono l'insieme delle chiome poiché essa diminuisce all'aumentare della rugosità della superficie su cui incide la radiazione. Ad es. una copertura forestale ha valori giornalieri medi di albedo di circa 0,10 nel caso di conifere e di circa 0,16 nel caso di specie decidue.

Le caratteristiche spettrali della vegetazione relative all'assorbimento, riflessione e trasmissione della radiazione solare, determinano quindi la qualità della luce che giunge al suolo e che risulta relativamente arricchita nell'infrarosso vicino e impoverita nelle lunghezze d'onda del blu e del rosso. Tale situazione, insieme ad una riduzione dell'intensità luminosa, condiziona lo sviluppo delle specie vegetali di «sottobosco». A questo riguardo, molti studi sono stati svolti, in campo forestale, su plantule di conifere e latifoglie al fine di stabilire i minimi livelli radiativi necessari per il loro sviluppo. Ad es. l'intensità luminosa più favorevole alla sopravvivenza e allo sviluppo di semenzali d'abete è compresa fra il 15 e il 50% della luce piena.

La quantità e qualità di luce che giunge al suolo influenza inoltre lo sviluppo e l'attività dei microrganismi preposti alla decomposizione della sostanza organica e alla liberazione degli elementi minerali.

Le caratteristiche spettrali della vegetazione possono essere modificate in conseguenza all'instaurarsi di condizioni di stress. Ad es. l'inquinamento da SO₂ determina il collassamento progressivo delle cellule del tessuto a palizzata per cui l'intera foglia riduce lo spessore prima che compaia qualsiasi sintomo esterno; in presenza di danni acuti, ad es. le piante sempreverdi

aghiformi presentano una colorazione rosso-brunastra e subiscono una defoliazione precoce. Una trattazione più ampia dei danni da inquinamento è riportata nella sezione «Effetti dell'inquinamento atmosferico sulla vegetazione» curata da P. Grossoni e G. Lorenzini.

L'effetto della vegetazione sulla *quantità* di radiazione solare che giunge al suolo è funzione dell'architettura della chioma cioè dell'orientamento spaziale delle foglie, delle proprietà spettrali delle foglie, della distribuzione angolare della radiazione incidente e della proporzione tra radiazione diretta e diffusa (radiazione diretta e radiazione diffusa sono intercettate in modo diverso dalla vegetazione).

L'architettura di una copertura vegetale è descritta da:

- l'indice di area fogliare (m^2 di area fogliare per m^2 di suolo): esso dipende dall'area fogliare della singola pianta e dalla densità delle piante;
- la densità media dell'area fogliare ($m^2 m^{-3}$). La densità del fogliame si distribuisce in modo normale con l'altezza nella maggior parte delle specie vegetali.

Esistono molti modelli matematici che permettono di stimare l'intercettazione della luce da parte di una pianta isolata, di una fila di piante o di un raggruppamento di piante (stand).

I parametri fondamentali che è necessario conoscere, qualunque sia il modello matematico che si intende utilizzare, sono: l'indice di area fogliare e il coefficiente di estinzione. Quest'ultimo dipende dalla specie vegetale, dalla densità della copertura, dall'orientamento spaziale delle foglie e dall'angolo di elevazione solare. Il coefficiente di estinzione è molto difficile da misurare, specialmente nel caso di piante arboree. In boschi di conifere esso può variare tra 0,3 e 0,6.

Nel caso di coperture vegetali continue l'energia radiante intercettata può essere calcolata mediante la legge di Beer. Nel caso di coperture discontinue è importante considerare la frazione di energia che passa attraverso la chioma e quella che arriva al suolo attraverso le aperture della copertura.

In questo caso è necessario modellizzare la geometria dell'albero e quindi conoscere l'altezza, la densità dell'area fogliare, la forma della chioma e la forma delle foglie. Numerosi modelli sono stati messi a punto per valutare l'intercettazione della radiazione luminosa da parte di coperture discontinue forestali. Essi assumono che la distribuzione delle foglie sia casuale, con la stessa probabilità di trovarsi all'interno del volume della copertura, e che siano casuali gli azimuth e gli orientamenti fogliari. La forma della chioma è usualmente descritta mediante forme geometriche semplici come coni o ellissoidi.

L'effetto della forma della chioma sull'intercettamento della luce è molto più piccolo che non la densità del fogliame quando le piante, facenti parte di uno stand, si ombreggiano reciprocamente. Inoltre, almeno per chiome dalla forma conica, le differenze nell'assorbimento della luce sono piccole per valori ragionevoli del rapporto altezza/raggio, cioè per valori compresi tra 10 e 20. Nel caso in cui la densità e disposizione delle piante sia tale da evitare il reciproco ombreggiamento, i modelli matematici indicano nella forma stretta (rapporto altezza/raggio elevato) delle chiome la forma più efficiente ad alte latitudini e nella forma allargata la forma leggermente più efficiente a basse latitudini.

Nel campo della pianificazione e progettazione del verde urbano risulta fondamentale la conoscenza della forma della chioma nel suo insieme (forma tondeggiante, allungata, ecc.) al fine di prevedere la dimensione dell'ombra che essa proietterà in un certo momento dell'anno. Tale previsione permette di ottenere le migliori condizioni di ombreggiamento in modo tale da ridurre l'irraggiamento delle pareti degli edifici e quindi il riscaldamento dei locali interni soprattutto nei mesi estivi. L'ombreggiamento delle pareti esposte a sud è quello più problematico poiché l'ombreggiamento persiste anche durante i mesi invernali quando al contrario, ai fini di un risparmio energetico, è necessaria una buona illuminazione. Per questa situazione, in generale, si considera che le specie più adatte siano quelle caducifoglie; in realtà la maggior parte di queste, anche se prive di foglie, effettuano un elevato ombreggiamento attraverso rami, fiori e frutti. Un fattore quindi importante nella progettazione del verde urbano è la trasparenza della chioma spoglia. Essa varia innanzitutto con la specie: es. il Platano permette la penetrazione del 50% della luce mentre il *Ginkgo biloba* ha una trasparenza dell'80%.

Il regime luminoso in un gruppo di alberi può essere comunque controllato mediante tagli selettivi dove dimensione, forma e orientamento delle aperture possono essere scelte per controllare la temperatura e l'irraggiamento della superficie del suolo modificando la sua capacità di ombreggiamento.

L'influenza del singolo albero o del gruppo di alberi non riguarda solo il flusso radiativo in entrata ma anche il flusso radiativo in uscita, cioè la radiazione ad onde lunghe emessa dal suolo che è funzione della quarta potenza della sua temperatura. Durante la notte, quando la radiazione in entrata può essere considerata zero, la vegetazione costituisce uno schermo al flusso di energia emesso dal suolo sottostante (che comunque, essendosi scaldato meno durante il giorno, in conseguenza dell'ombreggiamento, emetterà una quantità di radiazione inferiore a quella di un suolo in zona aperta) ritardando il raffreddamento dello strato sottostante le chiome. Tale inter-

vento è legato anche ad una riduzione della turbolenza dell'aria all'interno della fascia arborata e quindi ad una riduzione del mescolamento di strati di aria a diversa temperatura. La vegetazione svolge quindi anche un'azione di volano termico.

Intercettamento del vento

Le fasce di vegetazione arborea consentono di smorzare i venti modificando il microclima; l'efficacia di queste fasce persiste tutto l'anno con piante sempreverdi (cipressi, eucalipti, ecc.). Nella loro funzione di frangivento, assume grossa importanza, accanto alla persistenza dell'apparato fogliare, l'altezza, la porosità e la lunghezza delle fasce. Più alte sono, più profonda è la zona sottovento su cui fanno sentire la loro influenza. Una barriera densa può proteggere un'area con una profondità di circa 10-15 volte l'altezza del frangivento. Aumentando la porosità della barriera a circa il 50%, la zona influenzata ha una profondità di circa 20-25 volte l'altezza del frangivento. Infatti, una porosità maggiore permette al vento di penetrare all'interno della barriera, eliminando i fenomeni di turbolenza dell'aria sia nella zona sopravento che sottovento. La maggiore efficacia delle fasce si ottiene quando la densità delle chiome presenta il 30-40% di spazi aperti. La percentuale di spazi aperti dovrebbe comunque essere diversa a seconda dell'altezza dal suolo; infatti la porosità vicino al suolo, dove la velocità del vento è più bassa, dovrebbe essere superiore a quella delle chiome. Idealmente la densità della barriera dovrebbe aumentare logaritmicamente con l'altezza in accordo al profilo della velocità del vento.

Anche la lunghezza della barriera frangivento è molto importante; se una barriera è troppo corta o se ci sono delle interruzioni larghe, si può verificare un aumento della velocità del vento, invece che un suo smorzamento, con un peggioramento della situazione.

Altri parametri che influenzano l'efficacia delle fasce sono: la rugosità della vegetazione e l'angolo d'incidenza tra fascia e direzione del vento dominante.

Intercettamento degli inquinanti

Numerosi studi sono stati compiuti per valutare la capacità di intercettamento degli inquinanti da parte di molte specie vegetali e per individuare

le caratteristiche «strutturali» delle singole piante e del raggruppamento che permettono la massima funzionalità. Piante con foglie piccole e ruvide sono le più efficienti nella raccolta, per impatto, delle polveri inquinanti. Un basso rapporto volume/superficie è fondamentale per l'intercettazione degli inquinanti gassosi.

Anche la struttura degli impianti arborei può influire in modo determinante sull'efficienza di attenuazione dell'inquinamento. Infatti fasce eccessivamente permeabili sono inadatte sia per l'attenuazione delle polveri inquinanti che per gli inquinanti gassosi; le fasce molto permeabili sono adatte per l'intercettazione delle polveri mentre la permeabilità deve essere ulteriormente ridotta per l'attenuazione degli inquinanti gassosi. Altri accorgimenti che possono migliorare l'efficienza riguardano l'aumento della superficie assorbente, che può essere raddoppiata utilizzando un profilo sinusoidale, e la creazione di aperture e radure all'interno della fascia in modo tale da favorire gli scambi gassosi e quindi aumentare i contatti tra inquinanti e foglie.

Altra caratteristica che non deve essere dimenticata è la persistenza dell'apparato fogliare. Le specie sempreverdi sono normalmente meno resistenti agli inquinanti perché, persistendo le foglie per più anni, su di esse si ha un accumulo di sostanze nocive. D'altronde le specie caducifoglie hanno un effetto filtrante minore durante i mesi invernali anche se la deposizione di polveri può mantenersi alta per impatto con i rami.

L'intercettazione degli inquinanti da parte delle chiome arborate determina in modo indiretto una modifica delle caratteristiche chimiche del terreno; infatti gli inquinanti accumulati sulle porzioni aeree della vegetazione sono dilavati dalla pioggia raggiungendo il suolo e modificandone il pH.

Effetti dell'inquinamento atmosferico sulla vegetazione

Tutte le sfere di interesse della società sono coinvolte nelle problematiche dell'inquinamento, dalla salute umana agli aspetti economici (perdite di produzione da parte delle piante agrarie, danni ai manufatti), a quelli culturali (degrado delle opere d'arte e dei monumenti). Vi è il sospetto che i fenomeni che riusciamo a percepire altro non siano che una sorta di «punta di iceberg», mentre la maggior parte degli effetti pericolosi degli inquinanti si realizza in condizioni non visibili, magari attraverso complesse interazioni tra sostanze tossiche di varia origine e natura.

In sintesi, gli aspetti più importanti dell'inquinamento atmosferico (si fa riferimento solo alla contaminazione chimica) possono essere descritti come sotto riportato.

- (a) *Fenomeni a lungo e lunghissimo termine*: si tratta di modificazioni significative di situazioni naturali (che presentano oscillazioni anche ampie), per le quali stiamo assistendo a rapidi cambiamenti; il difficile consiste nell'estrapolare correttamente gli andamenti attuali, utilizzando soprattutto modelli matematici; i problemi ad essi connessi coinvolgono territori ampissimi, sino ad interessare l'intero pianeta;
- (b) *episodi accidentali acuti*: sono per lo più legati ad attività produttive (industriali, energetiche), ma, per fortuna, stanno perdendo di importanza; possono essere causa di gravissimi danni ambientali (anche sulla salute umana) ed hanno rilevanza generalmente su scala locale; per la loro casualità non verranno trattati in questa sede;

* Dipartimento di Coltivazione e Difesa delle Specie Legnose, Pisa.

** Dipartimento di Biologia Vegetale, Firenze.

- (c) *presenza costante di inquinanti gassosi e particellari*: sostanze di origine antropica, per lo più connesse con le emissioni prodotte dai processi di combustione, sono quotidianamente introdotte nell'atmosfera, ove si disperdono, dando luogo a reazioni di varia natura e ricadono al suolo, interagendo con i diversi recettori, biotici e non, spesso in maniera cronica e asintomatica.

Problemi di inquinamento con conseguenze a lungo termine

L'effetto serra e i mutamenti climatici globali

Vi sono evidenze che le attività umane stanno alterando la composizione chimica dell'atmosfera, dando luogo ad una vera e propria «trappola energetica». In particolare, si sta assistendo ad una costante ascesa delle temperature medie, collegata all'aumentata presenza in atmosfera di gas che assorbono la radiazione infrarossa emessa dalla Terra e dispersa nello spazio, e ne rimandano una gran parte indietro. Questi cosiddetti «gas serra» sono componenti minoritari dell'atmosfera (molto meno dell'1% del totale), e sono principalmente l'anidride carbonica (responsabile di circa il 50% del problema), i clorofluorocarburi, CFC (che sono noti anche per il loro ruolo di «killer» dell'ozono stratosferico), il metano, l'ossido nitroso (o protossido di azoto, N_2O), e l'ozono troposferico. In effetti, il principale agente «serra» dell'atmosfera terrestre è il vapor d'acqua, che contribuisce per circa 100 dei 148 W che attualmente interessano, come energia radiativa, ciascun metro quadrato di superficie terrestre. Però, il livello di vapore acqueo presente in atmosfera è, di fatto, incontrollabile, in quanto esso proviene prevalentemente dall'evaporazione degli oceani.

Le concentrazioni medie di anidride carbonica nell'atmosfera sono andate costantemente aumentando negli ultimi 150-200 anni, vale a dire dall'inizio della rivoluzione industriale e dello sfruttamento dell'energia termoelettrica. Un secolo fa la concentrazione era pari a 290 parti per milione (ppm, in volume), mentre oggi siamo già intorno a 350 ppm; il «trend» appare irreversibilmente verso l'alto (la crescita è esponenziale), con un tasso di incremento annuo pari allo 0,4%. La produzione annua è di 6 miliardi di tonnellate. Ad un raddoppio del livello di anidride carbonica dovrebbe corrispondere un aumento della temperatura media di 3,6°C.

Appare questa essere indubbiamente una delle sfide ambientali più importanti della nostra era. La decade degli anni '80 ha presentato i sei anni

SCALE DEI PROBLEMI AMBIENTALI

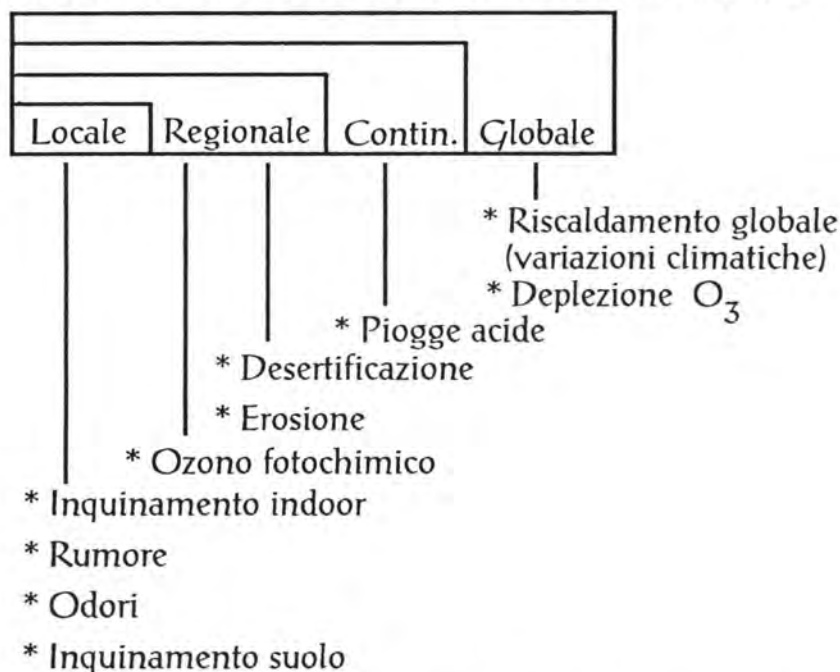


FIG. 1. — Le dimensioni geografiche dei problemi dell'inquinamento atmosferico spaziano da situazioni locali a coinvolgimenti di ordine globale.

più caldi da quando i dati meteorologici vengono rilevati. Nell'ultimo secolo la temperatura media annuale è aumentata di oltre mezzo grado, e le stime indicano che il costante ulteriore incremento potrebbe addirittura raggiungere valori di 1,5-4°C, e questi valori sarebbero i più alti degli ultimi 100.000 anni.

La tendenza al riscaldamento globale è certa, anche se il fenomeno è avvenuto sinora in maniera non uniforme: si è avuto, infatti, un periodo di raffreddamento tra il 1940 e il 1970, nonostante che le concentrazioni di «gas serra» siano aumentate. Anche il ruolo delle «isole di calore» urbane sull'attendibilità di molte letture delle temperature dovrebbe essere valutato.

I cambiamenti previsti sono numerosi, e in larga parte sono di segno negativo. Innanzitutto, il riscaldamento globale comporterà la crescita del livello medio dei mari (come conseguenza del disgelo ai poli, la cui temperatura potrebbe aumentare addirittura di 10°C, e della minore copertura delle

nevi e dei ghiacciai). Vi sono stime che indicano un innalzamento di ben 65 cm entro il 2100. Le conseguenze socio-economiche sarebbero enormi: basti pensare al fatto che tutti gli insediamenti costieri finirebbero per essere sommersi e la mappa delle terre emerse subirebbe profonde modificazioni.

Mutamenti climatici anche di lieve entità fungeranno da importanti fattori di selezione e manderanno in crisi ecosistemi a rischio: in zone semiaride la riduzione della piovosità comprometterà le già modeste possibilità di allevare le colture. Spostamenti delle zone climatiche saranno inevitabili e causeranno forti stress agli organismi animali e vegetali. Per alcune specie si creeranno situazioni più favorevoli, ma per la maggior parte dei casi si avranno notevoli svantaggi, con concreti pericoli di estinzione; si verranno a creare ecosistemi oggi inesistenti. Per l'uomo si avranno variazioni nella disponibilità di cibo, combustibili, materiali da costruzione. La geografia economica di interi continenti verrà stravolta, con inevitabili conseguenze di ordine sociale e politico.

Dal punto di vista della produttività vegetale, gli incrementi previsti di anidride carbonica potranno avere effetti benefici, in quanto gli attuali livelli costituiscono un fattore limitante per la piena espressione del potenziale fotosintetico. Inoltre, l'aumento di temperatura comporterà, nelle zone temperate, l'espansione delle aree coltivabili, un allungamento della stagione di possibile coltivazione ed un accorciamento del ciclo vegetativo. Ad esempio, un incremento di temperatura di 1°C sposterà verso nord di 300 km l'area di possibile coltivazione del girasole in Gran Bretagna e di 175 km quella del mais negli U.S.A. Vi sono da aspettarsi anche importanti variazioni nei rapporti tra le piante e i loro parassiti. Ovviamente, la situazione si aggraverà nelle attuali aree più calde.

Si stanno innescando meccanismi complessi, alcuni dei quali hanno effetti di retroazione positiva e altri negativa, solo in minima parte prevedibili con sufficiente approssimazione. L'elaborazione di modelli matematici porta spesso a risultati non concordanti e alla formulazione di scenari futuri differenti e talvolta contraddittori. Ad esempio, si può immaginare che un continuo riscaldamento potrebbe portare, in tempi lunghissimi, a variazioni nei cicli idrologici e alla formazione di una estesa coltre di nubi, che — a loro volta — rifletterebbero buona parte della radiazione in arrivo, con conseguente raffreddamento dei continenti! Se si sciolgono le nevi e i ghiacciai si riduce l'albedo (la riflettività della terra), con conseguente maggiore assorbimento della radiazione solare ed ulteriore aumento della temperatura. Importante è anche il ruolo delle eruzioni vulcaniche che immettono nella stra-

tosfera grandi quantità di polveri e aerosol e possono provocare un significativo raffreddamento a breve termine.

Purtroppo, questi modelli sono solo semplificazioni relativamente grossolane della miriade di complessi fenomeni che hanno luogo nell'atmosfera e nella biosfera. Un altro possibile approccio consiste nello studio di reperti storici (analisi di recenti periodi caldi) e nella ricostruzione degli scenari paleoclimatici (relativi ai periodi geologici in cui la Terra era più calda). In ogni caso, occorre ricordare come queste variazioni climatiche debbano essere inserite in andamenti a lunghissimo termine: si pensi che vi sono modelli numerici che prevedono una nuova età glaciale, che avrebbe il suo culmine tra 70.000 anni. Il rischio è che i cambiamenti avvengano ad una velocità superiore a quella che è necessaria per una loro comprensione e per la messa in atto delle opportune contromisure. Occorre evitare che l'umanità metta in piedi un esperimento geofisico su scala planetaria dagli esiti incerti. È anche in questa ottica che dovrebbe essere invertita l'attuale tendenza scellerata alla deforestazione: le piante, come noto, sono gli utilizzatori primari dell'anidride carbonica atmosferica.

L'acidificazione delle precipitazioni

La composizione chimica delle precipitazioni dipende dalle quantità relative delle varie sostanze, di origine naturale e antropica, che si trovano nell'atmosfera. In condizioni «normali» il pH dell'acqua di pioggia non è neutro, ma, bensì leggermente acido (5,6), a causa della presenza, nell'aria, di anidride carbonica, la quale dà luogo, in combinazione con il vapore d'acqua, alla formazione di acido carbonico. Vi sono anche altre minori componenti acide naturali. Campioni di ghiaccio di epoche precedenti la rivoluzione industriale presentano valori di pH ben superiori a 5,0.

La situazione attuale, invece, è caratterizzata dalla progressiva acidificazione delle precipitazioni, provocata dalla presenza di sostanze che si formano soprattutto nei processi di combustione. Il problema ha origini remote, e si può far risalire già al 1661 la prima osservazione sull'influenza nociva delle emissioni aeree industriali sulla salute delle piante e degli esseri umani. È da alcuni decenni, però, che la materia ha assunto dimensioni tali da costituire elemento di viva preoccupazione a livello mondiale. Valori di pH della pioggia intorno a 4 sono ormai comuni, e si sono registrate punte record di pH 1,5 (più acide del succo di limone!). Il record europeo è di 2,4. Com'è noto, la scala del pH è su base logaritmica, così, ad un abbassamento di un punto corrisponde un aumento di dieci volte del contenuto acido.

I maggiori responsabili del fenomeno sono individuabili nell'ossido di zolfo (anidride solforosa, SO_2) e negli ossidi di azoto (NO e NO_2 , collettivamente indicati con NO_x), i quali, una volta emessi in atmosfera, danno luogo ad una complessa serie di reazioni chimiche, che portano alla formazione di acidi forti (solforico e nitrico, rispettivamente). Le principali fonti antropiche (ve ne sono di naturali, come le eruzioni vulcaniche) di SO_2 sono le combustioni; infatti, lo zolfo è un normale costituente dei materiali fossili solidi (carbone) e liquidi (petrolio) e la SO_2 è presente tra i prodotti della combustione. Pertanto, le attività maggiormente importanti sotto questo profilo risultano essere la produzione di energia (con processi termici), il riscaldamento domestico e numerosi impianti industriali. L'importanza relativa di queste sorgenti varia durante l'anno e nelle diverse realtà tecnologiche. La riduzione del tenore in zolfo nei combustibili e/o nei prodotti della combustione e l'adozione di strategie energetiche alternative a quelle termoelettriche rappresentano le principali soluzioni del problema.

Gli NO_x devono essere considerati un prodotto «involontario» delle combustioni; infatti, l'azoto e l'ossigeno, che sono i principali componenti dell'atmosfera, sono — in condizioni normali — inerti, ma, ad elevate temperature (superiori a 1000°C) reagiscono tra di loro, a formare i composti in questione. Il traffico veicolare, il riscaldamento domestico e la produzione di energia elettrica per via termica sono le più importanti sorgenti di inquinamento da NO_x . Non si può, in questo caso, intervenire sulla qualità dei combustibili, ma occorre agire nelle fasi della post-combustione, per ridurre le emissioni.

In un secolo le emissioni antropiche di ossidi di zolfo e di NO_x sono aumentate di circa 10 volte. Sino ad alcune decadi or sono, l'inquinamento atmosferico era un problema limitato alle grandi aree urbane ed industriali. Si assisteva a episodi acuti, talvolta gravi (alte concentrazioni per periodi anche brevi), ma di limitata ampiezza geografica. La situazione è andata modificandosi con l'adozione, da parte delle principali sorgenti di contaminanti, di misure atte a meglio disperdere nell'ambiente i prodotti della combustione; in particolare, si è assistito al progressivo innalzamento dell'altezza delle ciminiere, e si sono superate le quote di 400 m. Ma, in questo caso, *la diluizione non è la soluzione*: infatti, le grandi masse di inquinanti non si riversano più in un contesto spaziale ristretto, ma — spinte dalle correnti aeree — finiscono per interessare i recettori in aree lontane anche centinaia di chilometri. Pertanto, questa è una forma di inquinamento i cui effetti sono dilazionati nel tempo e nello spazio, e per la quale risulta assai arduo lo stabilire una correlazione tra causa ed effetto.

Si verifica anche che una certa area geografica subisca i danni dovuti ad inquinanti prodotti da un'altra; è questo il caso della Scandinavia, sottoposta da anni alle ricadute delle emissioni del Regno Unito. Si parla, in proposito, di inquinamento «transfrontaliero», e si sono già verificate ripercussioni a livello politico e diplomatico. Il 70% dello zolfo che inquina la Svezia meridionale trae origine dalle attività umane; di questo, il 77% proviene da fonti esterne al Paese.

Tale è la costanza di ricorrenza di queste forme di inquinamento a larga scala, che, ormai, i tempi sono maturi per iniziare a considerare questi fattori come vere e proprie componenti di quella che possiamo definire la «climatologia chimica».

Moltissime sono le conseguenze negative della progressiva acidificazione delle precipitazioni. Si pensi all'aggressione subita dai materiali lapidei (marmi) e da altri manufatti (es. metalli). I marmi del Partenone hanno subito più danni erosivi negli ultimi tre decenni che non in 24 secoli.

A livello biologico, il recettore maggiormente sensibile è forse rappresentato dai bacini di acqua dolce, specie se a lento ricambio. Infatti, la fauna ittica è particolarmente sensibile alle variazioni di pH (la reazione normale dell'acqua di lago è prossima alla neutralità), e l'acidificazione porta alla rarefazione e all'estinzione di numerose specie (tra le quali i pesci più pregiati), ed alla proliferazione di specie acidofile (in particolare insetti e vegetali inferiori). Oltre ad un effetto diretto dell'acidità sugli organismi, svolge un ruolo importante la liberazione di ioni alluminio e di altri elementi (presenti nel terreno, ma normalmente immobilizzati a valori di pH neutri), fortemente tossici per la vita animale e vegetale.

Le conseguenze sulla chimica e la biologia dei laghi sono gravissime e in Scandinavia sono ormai parecchie migliaia i bacini ormai irreversibilmente acidificati, nonostante ripetuti tentativi di contrastare l'andamento con l'aggiunta di sostanze alcaline («calcitazioni»); si tratta di costosi palliativi che non rimuovono alle radici le cause del problema. Sotto questo profilo, ogni bacino ha una risposta specifica, in relazione al tipo di suolo e sottosuolo, alle capacità tampone, alle caratteristiche delle precipitazioni locali. I rischi maggiori sono corsi dai laghi nordici e da quelli alpini, in quanto si ha un vero e proprio «shock acido» a primavera, quando, con il disgelo, essi sono rapidamente interessati da grosse quantità di materiali acidi (di provenienza atmosferica) accumulatisi nella neve e nel ghiaccio durante il periodo freddo.

Un altro importante problema è rappresentato dalla costante acidificazione dei suoli forestali. Tra le conseguenze più preoccupanti sono la lisciviazione di elementi basici, la già descritta liberazione di ioni alluminio (che

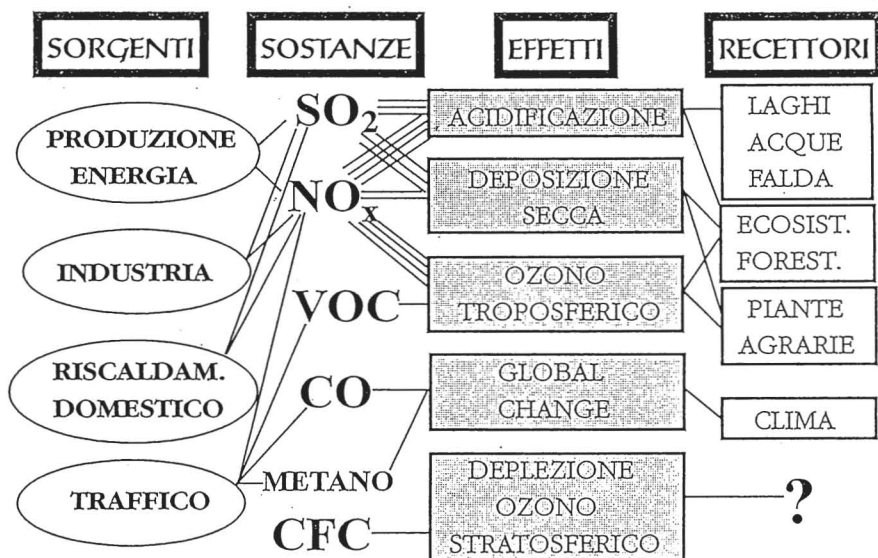


FIG. 2. — Una sintesi schematica delle principali sorgenti di inquinanti atmosferici, dei loro effetti e dei loro recettori. Gran parte delle interazioni di ordine biologico legati al «Global Change» sono soltanto ipotizzate.

potrebbero anche inquinare la falda e creare problemi per la potabilità delle acque), nonché le variazioni indotte negli equilibri microbici, con ripercussioni sui cicli biogeochimici e sullo stato sanitario delle radici (ad esempio, con compromissione dei consorzi micorrizici). Minori sono i problemi per i suoli agrari, sistematicamente sottoposti ad interventi chimici (fertilizzazioni, ammendamenti).

Numerosi sono anche i possibili effetti nocivi subiti direttamente dalle piante: soprattutto sembrano importanti i fenomeni di erosione delle strutture cuticolari, che svolgono fondamentali funzioni di protezione delle foglie. Così, a seguito della ripetuta esposizione alle piogge acide (ma, al riguardo, sembrano importanti anche le nebbie acide), si può avere perdita di elementi (per lisciviazione), mancato controllo della traspirazione, minore resistenza alla siccità e ad altri stress ambientali. Le deposizioni acide sono pesantemente indiziate di svolgere un ruolo importante nel cosiddetto «deperimento di nuovo tipo» che da qualche tempo sta affliggendo il patrimonio forestale di numerosi Paesi europei.

Effetti fitotossici degli inquinanti atmosferici

Aspetti generali

Gli inquinanti che comunemente vengono immessi in atmosfera e che svolgono un'importante azione nociva per l'ambiente non sono molto numerosi, su scala globale, anche se dobbiamo tenere in evidenza i casi e le situazioni locali. Si parla di inquinanti «primari» per indicare quelli che manifestano la loro tossicità nella forma chimica in cui sono prodotti: si tratta dei contaminanti classici, in primo luogo la SO_2 , i composti del fluoro, il cloro e l'acido cloridrico. Sono definiti «secondari», invece, quelli che derivano da reazioni innescate da quelli primari; il più noto è l'ozono di origine fotochimica.

Per meglio comprendere l'importanza dell'argomento, è opportuno partire da un concetto generale: le piante sono, di norma, maggiormente sensibili all'azione nociva della maggior parte degli inquinanti atmosferici rispetto all'uomo e agli animali in genere. Costituiscono importanti eccezioni a questa regola il monossido di carbonio, l'idrogeno solforato e l'acido cianidrico. Le basi della maggiore sensibilità delle piante risiedono in una mancanza di meccanismi efficaci di selezione («esclusione»), abbinata ad una maggiore quantità degli scambi gassosi tra organismo (pianta) e ambiente. Derivano da questa considerazione di base, almeno due distinte sfere di interesse, rappresentate, rispettivamente, da: (a): lo studio e la valutazione degli effetti fitotossici degli inquinanti, anche in termini economici; (b): la possibilità di utilizzare idoneo materiale vegetale (le cosiddette «piante indicatrici») per la valutazione della qualità dell'aria. Inoltre, sarebbe interessante valutare la possibilità dell'impiego dei vegetali per la «detossificazione» degli ambienti inquinati.

Gli effetti fitotossici degli inquinanti possono essere diversi, in relazione anche alla «scala di lettura» che si adotta. Si possono avere sintomi visibili, riduzioni di sviluppo (anche in assenza di alterazioni macroscopiche), disturbi nei processi riproduttivi, minore produttività dell'ecosistema, cambiamenti nei rapporti tra le specie nelle comunità vegetali.

Il processo di fitotossicità può essere considerato il risultato di una serie di eventi, distinguibili in tre distinte fasi: (a) l'esposizione e l'assorbimento; (b) la tossicocinetica, che comprende il trasferimento e la metabolizzazione dell'inquinante; (c) la tossicodinamica, cioè l'interazione tra la sostanza tossica ed il tessuto «bersaglio» (recettore). Questa risposta può essere costituita da una inibizione enzimatica irreversibile, dalla sintesi di un composto letale o comunque nocivo, da lesioni biochimiche, dall'inattivazione di una

sostanza essenziale, o dalla interferenza con il funzionamento delle membrane cellulari.

Anche per gli inquinanti dell'aria si possono applicare i modelli generali della tossicologia, che prevedono: (a) sostanze ad «effetto soglia» (se non viene superata una determinata concentrazione non si ha alcun effetto nocivo irreversibile ed il sistema è omeostatico); (b) veleni ad effetto additivo, in cui ciascuna «dose» è responsabile di un danno irreversibile all'organismo; (c) tossici cumulativi, in cui ogni dose assunta si somma a quelle precedenti, ed è potenzialmente dannosa.

Una delle risposte che si osservano sperimentalmente nelle piante a seguito dell'esposizione prolungata a concentrazioni realistiche di inquinanti è un'alterazione dei rapporti tra biomassa epigea (foglie e fusto) ed ipogea (radici). Le variazioni sono sistematicamente a vantaggio delle porzioni aeree; ciò significa che le piante allevate in ambiente inquinato tendono a ridurre maggiormente gli apparati radicali, rispetto alle altre regioni. Il tutto, spesso, avviene in assenza di concomitanti manifestazioni sintomatologiche macroscopicamente apprezzabili. Un fenomeno del genere può avere, sotto il profilo pratico, rilevanti effetti negativi, in quanto, ad esempio, una pianta così alterata può trovarsi in difficoltà a reagire ad una situazione di stress idrico; anche la resistenza al vento (si pensi alle specie legnose) può essere ridotta. Ovviamente, una tale situazione sfugge alla percezione in condizioni di pieno campo, essendo rilevabile soltanto a seguito del confronto tra piante cresciute in ambiente inquinato ed altre — identiche — mantenute, ad esempio, in aria filtrata.

La risposta delle piante agli inquinanti non è omogenea, ed esistono notevoli differenze tra le varie specie e, al loro interno, tra le varietà o cultivar. Anche i fattori ambientali possono condizionare il comportamento dei vegetali.

Ozono troposferico

Attualmente il margine tra le concentrazioni di fondo e la soglia di azione biologica dell'ozono, che è anche un componente naturale dell'atmosfera, è notevolmente ridotto così da lasciare scarso spazio per la definizione di livelli di sicurezza. In presenza di idonee condizioni climatiche (e, in particolare, di stabilità atmosferica, alta temperatura e radiazione solare), gli NO_x e gli idrocarburi incombusti (tutti provenienti dai processi di combustione, in particolare dai motori a scoppio) fungono da precursori di una serie di reazioni che, a partire dall'ossigeno, portano alla formazione di ozono, molecola fortemente reattiva ed in grado di esplicare notevole attività tossica per gli organismi.

Si tenga presente che, seppure chimicamente identico all'altro, questo ozono troposferico (che si definisce fotocchimico, in quanto per la sua formazione è indispensabile la presenza delle radiazioni solari UV, che rompono i legami degli atomi di ossigeno), svolge funzioni completamente diverse dall'ozono stratosferico, noto per i suoi benefici effetti schermanti delle radiazioni solari UV a corta lunghezza d'onda. In sintesi, l'attività dell'uomo sembra essere così scellerata che abbassa i livelli di quello utile (deplezione della fascia di ozono stratosferico) e contemporaneamente aumenta la concentrazione di quello tossico (inquinamento fotocchimico).

In realtà, le reazioni che portano alla formazione dell'ozono sono complesse e danno luogo ad una lunga serie di altri composti ossidanti (nitrato di perossiacetile, aldeidi, chetoni, acidi organici e inorganici, sia liberi, sia sotto forma di aerosol) nell'ambito del cosiddetto «smog fotocchimico», noto anche con l'appellativo di «tipo Los Angeles». In questi termini, l'ozono deve essere considerato un «marker» di una complessa situazione di inquinamento.

La distribuzione temporale di questo inquinante segue profili del tutto peculiari. Infatti, l'ozono si forma solo durante le ore diurne, e si distrugge la notte, per reazioni chimiche ed interazioni fisiche; nella stagione fredda i livelli sono modesti, mentre i massimi valori si riscontrano in estate. Appare chiaro come la sede primaria della formazione dell'ozono fotocchimico sia costituita dalle aree urbane e metropolitane (in relazione al volume di precursori emessi dai veicoli); nonostante ciò, anche le zone rurali ed i siti remoti spesso sono sottoposti a livelli pericolosi di questo inquinante, perché sia i precursori, sia l'ozono stesso, possono essere trasportati a distanza dalle correnti aeree. Si consideri, poi, che nelle aree molto inquinate il tasso di decomposizione dell'ozono è assai elevato.

I meccanismi di fitotossicità dell'ozono sono complessi e si basano sulla grande reattività di questa molecola, specialmente con i lipidi di membrana e sui meccanismi fotosintetici. Frequente è l'induzione di uno stato di senescenza precoce, con clorosi fogliari diffuse. È da sottolineare come le prestazioni produttive delle piante (in termini sia quantitativi, sia qualitativi) possano essere ridotte anche in assenza di concomitanti manifestazioni sintomatologiche visibili (si parla, in proposito, di «danno invisibile»). Solo la disponibilità di sofisticati mezzi di indagine (ad esempio, strutture che consentano di «escludere» mediante filtrazione gli inquinanti dall'aria ambiente) ha consentito, in epoca recente, l'apprezzamento di queste situazioni.

Si deduce facilmente che l'inquinamento atmosferico è anche responsabile di perdite economiche associate alle riduzioni produttive delle piante agrarie. Un'idonea valutazione di questo aspetto fornirebbe utili indicazioni

per una più corretta interpretazione delle analisi «costo-beneficio» in materia ambientale. In Olanda le perdite associate alla fitotossicità dell'ozono sono presunte essere pari al 3,4%, mentre per la sola provincia di Piacenza si parla di una stima annua pari a 4,6 miliardi di lire. Stime nord-americane indicano che in presenza di una concentrazione media giornaliera (su base stagionale) delle 7 ore consecutive più elevate (di norma tra le 10 e le 17) pari a 60 ppb, le prestazioni produttive (in termini quantitativi) di importanti specie agrarie subiscono rilevanti riduzioni; ad esempio, per la soia: -16%; per il mais: -5%; per il cotone: -21%; per l'arachide: -20%; per il fagiolo: -15%; per il tabacco: -9%; per l'erba medica: -12%, e così via. Si tenga presente che una tale concentrazione media è da ritenersi rappresentativa anche di molte realtà agricole nazionali, tra cui la Pianura Padana. Prove di filtrazione dell'aria ambiente in condizioni di inquinamento prevalente da ozono in Pianura Padana hanno indicato come la riduzione della maggior parte degli inquinanti atmosferici comporta aumenti di rese sostanziali, come, ad esempio, 10% in zucchini e 30% in fagiolo.

Inquinamento da piombo e da altri metalli pesanti

Un altro importante problema relativo alla contaminazione ambientale è quello relativo alla ormai ubiquitaria presenza dei metalli pesanti; si tratta di elementi, molti dei quali non sono biologicamente indispensabili, in grado di dare luogo nel lungo periodo a pericolose forme croniche di intossicazione.

I principali motivi di preoccupazione sono suscitati dal piombo, la cui pressoché unica sorgente antropica è rappresentata dagli additivi antidetonanti (Pb-tetraetile e tetrametile) presenti nelle benzine. Ogni litro di carburante contiene in media 500 mg di Pb, gran parte del quale finisce per essere liberato nell'aria, sotto forma di particelle minutissime. Si tratta, pertanto, di una forma di inquinamento strettamente associata al traffico veicolare. Si stima che in una via di comunicazione con densità di traffico di 25.000 veicoli al giorno, vengano liberati annualmente circa 300 kg di Pb per chilometro. La crescente popolarità delle cosiddette «benzine verdi», i cui additivi non contengono piombo, appare costituire una soluzione determinante per il problema; si consideri, poi, che la presenza di piombo non consente l'adozione di efficaci dispositivi catalitici per l'abbattimento dei contaminanti gassosi dai gas di scarico. L'inquinamento lungo le strade è direttamente correlato con la distanza dalla carreggiata, in base al profilo della sezione, alle caratteristiche topografiche e al volume di traffico. General-

mente, è sufficiente allontanarsi poche decine di metri per avere una drastica riduzione dei livelli di questo inquinante.

I problemi in questione interessano solo indirettamente i vegetali: infatti, l'assorbimento per via fogliare e radicale è modesto, e fenomeni di fitotossicità manifesta non sono noti, almeno in condizioni realistiche. Il ruolo delle piante agrarie è, invece, quello di vettori a lungo termine di livelli anche bassi di piombo (e di altri metalli pesanti) nella catena alimentare, con possibili effetti patologici nell'uomo e negli animali erbivori, in cui causa disturbi cerebrali, aumento della pressione sanguigna e turbe dello sviluppo. Sarebbe opportuno regolamentare lungo le arterie di traffico la coltivazione delle piante destinate all'uso alimentare (e, in particolare, gli ortaggi da foglia ed i prati pascolati) in relazione a questo rischio di contaminazione.

Quello del «cocktail di microdosi» è l'argomento di maggiore rilevanza nella tossicologia dei tempi attuali: si assiste ad una continua assunzione di sostanze in tracce, di varia natura ed origine (inquinanti dell'aria e dell'acqua, farmaci, additivi alimentari, residui di fitofarmaci e di loro impurezze nelle derrate vegetali), tra le quali possono instaurarsi reazioni e fenomeni di sinergismo potenzialmente nocivi.

Si consideri che scheletri di 2-3000 anni fa contengono concentrazioni di piombo pari a 1/1000 di quelle che oggi consideriamo normali.

Rilevamento biologico degli inquinanti atmosferici

La conoscenza dello stato della qualità dell'aria e, in particolare, la «mappatura» dei principali inquinanti costituisce il primo, indispensabile, elemento per successivi interventi di tipo amministrativo, volti alla riduzione di eventuali situazioni critiche.

Il rilevamento della presenza degli inquinanti gassosi è, di norma, affidato a strumentazioni automatiche, assai sofisticate, le quali provvedono al campionamento dell'aria ed alla sua analisi su base chimica o chimico-fisica. Fattore limitante di questo approccio metodologico è la complessità di queste apparecchiature, che hanno costi di impianto e di gestione notevoli. Pertanto, la loro diffusione è limitata (ad esempio, in tutto il territorio nazionale sono in attività solo poche decine di analizzatori per l'ozono) e le informazioni da esse ottenibili hanno una valenza circoscritta. Vengono privilegiate limitate aree urbane ed industriali, così che la maggior parte del territorio non viene coperta in alcun modo. Inoltre, si prende in considerazione solo uno o pochi inquinanti (di solito l'SO₂, considerata «tracciante» degli effluenti dei processi di combustione), ma si rischia di perdere di vista la com-

plexità del problema, ed in particolare le possibilità di effetti sinergici tra sostanze tossiche copresenti.

In diversi casi si può sfruttare la notevole suscettibilità di certe piante nei confronti di importanti inquinanti per utilizzarle come «monitor» biologici, al fine di trarre indicazioni circa la presenza di quel contaminante. Sono impiegati, al riguardo, anche licheni (la cui distribuzione geografica è, ad esempio, influenzata dai livelli di biossido di zolfo nell'aria) e piante superiori.

IL SISTEMA INQUINANTI-MONITORAGGIO

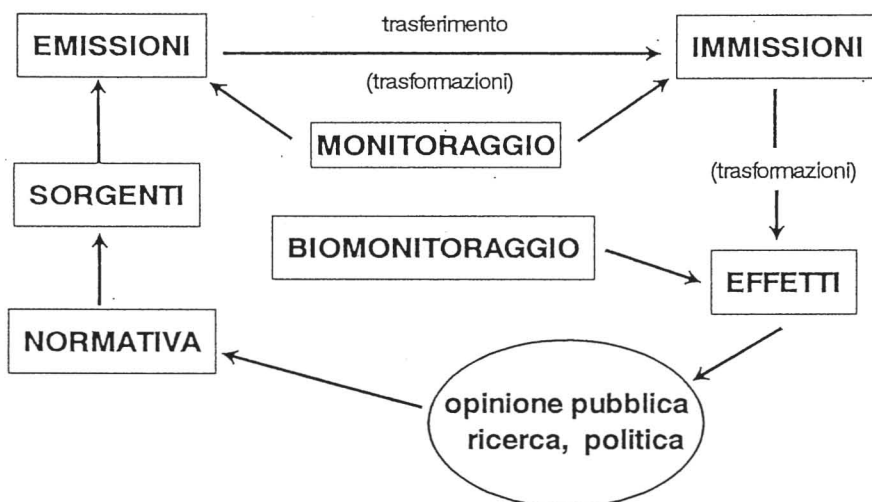


FIG. 3. — Il complesso «sistema» che lega le sorgenti di inquinanti, le sostanze liberate nell'ambiente, i loro effetti e le attività di regolamentazione, in relazione alle operazioni di monitoraggio con metodi chimico-fisici e con bioindicatori.

Uno dei casi più brillanti di biomonitoraggio degli inquinanti riguarda l'ozono troposferico. Da molti anni viene universalmente impiegata allo scopo una cultivar americana di tabacco (*Nicotiana tabacum* cv. Bel-W3). La storia di questa applicazione è curiosa: fino agli anni '50 questo tipo di tabacco era regolarmente coltivato nel Connecticut (USA) e le sue foglie impiegate come involucro esterno dei sigari. Cominciarono, quindi, a manifestarsi gravi quadri patologici, consistenti in minute necrosi fogliari di colore biancastro, interessanti entrambe le pagine di tutta la lamina. Pur in assenza di indica-

zioni circa le cause del fenomeno, gli agricoltori praticarono una selezione negativa, ed abbandonarono il materiale sensibile. Una volta dimostrato che l'agente causale dell'alterazione era l'ozono, nel 1962 fu iniziato il suo sfruttamento come sensore biologico dell'inquinamento fotochimico.

L'approccio metodologico è relativamente semplice. Si tratta di allevare le piante in presenza di aria filtrata (in serra o in cella climatica) e di mantenerle quindi in condizioni naturali. La presenza di ozono al di sopra di una soglia (intorno a 0,05 ppm, per esposizioni di 4-5 ore) provoca sulle foglie la comparsa dei sintomi descritti, la cui intensità è correlabile con i livelli di ozono presenti. Periodicamente si esegue la lettura dei sintomi, mediante scale di giudizio sintetiche (con l'impiego di standard di riferimento), e si calcola l'incremento di superficie necrotica rispetto alla lettura precedente.

Non vi è dubbio che il metodo, oltre ad essere sufficientemente affidabile ed economico (si da consentire un'adeguata mappatura del territorio) ha anche un potenziale educativo e didattico notevole: il mostrare al cittadino (opportunamente documentato) che l'aria che egli respira è responsabile di un tale devastante effetto biologico è sicuramente di gran lunga più coinvolgente che non il sottoporli complesse ed aride tabelle di dati numerici derivati dagli analizzatori automatici.

Ovviamente, si può prendere spunto da queste ultime considerazioni per sottolineare come le problematiche del degrado ambientale dovrebbero essere esaminate non solo sotto il profilo biologico (e, quindi, economico), ma — più in generale — anche come «marcatori» di un deterioramento globale della qualità della vita.

Effetti sulle cenosi vegetali

Sono numerose le indicazioni di effetti che hanno interessato anche in maniera globale determinate fitocenosi e che sono stati causati da episodi di inquinamento acuto. Fino ad oggi, tuttavia, non sono state segnalate alterazioni imputabili all'inquinamento diffuso che abbiano provocato modificazioni sostanziali a livello di interi tipi vegetazionali.

È necessario procedere ad una distinzione fra i diversi comportamenti nell'ambito dei grandi «sistemi» vegetali (aree forestali, agricole e urbane) nei confronti dell'impatto antropico tramite inquinanti. Le aree coltivate sono soggette per definizione a modificarsi nel tempo via via che cambiano gli indirizzi colturali; è difficile però poter individuare un'azione sequenziale fra inquinamento e cambiamento, anche se è ben noto che gli inquinanti interferiscono con la produttività delle piante coltivate.

Un'analogia situazione è rilevabile negli ambienti urbani: anche in questo caso la maggior parte delle piante sono coltivate e quindi non sono riconoscibili tipi vegetazionali nel senso biologico, ma solo particolari consociazioni.

Le aree forestali costituiscono i sistemi su cui è stata maggiormente studiata l'azione degli inquinanti. Alcune specie arboree sono risultate molto sensibili e quindi sono state le prime ad essere interessate in maniera particolare (*Abies alba* e *Picea abies* in Europa e *Picea rubens* nel Nord America). Tuttavia, questa forma di deperimento ha interessato ed interessa singoli individui e non associazioni nella loro totalità; inoltre, il deperimento delle foreste (*forest decline* o *Waldschäden*) è in realtà un fenomeno molto complesso, caratterizzato da più fattori di causa, fra i quali l'inquinamento atmosferico sembra rappresentare di norma o il fattore scatenante o quello contribuyente.

La rarefazione di alberi all'interno di un soprassuolo forestale e la riduzione delle chiome producono tre effetti principali: modificano il paesaggio, aumentano la quantità di energia che giunge al suolo, cambiano i rapporti fra le specie dominanti. Tuttavia, nei tre casi, non si può ancora parlare di alterazione dei tipi vegetazionali.

Molti habitat acquatici in cui l'eccesso di protoni derivanti dalle precipitazioni non riesce ad essere prontamente tamponato presentano profonde alterazioni, sia come rarefazione o scomparsa della vita (in laghi oligotrofici acidificati), sia anche come graduale incremento di piante fortemente acidofile, soprattutto nelle torbiere acide e nelle paludi (per esempio, gli sfagni e *Juncus bulbosus*).

Invece, non sono ancora numerose le segnalazioni di cenosi terrestri alterate in maniera significativa. A livello della componente forestale più caratteristica (gli alberi), la riduzione di esemplari di determinate specie ha modificato le relazioni fra gli alberi stessi; ad esempio nella catena montuosa tedesca del Fichtelgebirge nel 1986 il 70% degli abeti rossi era più o meno gravemente danneggiato. Però, nella maggior parte dei casi, questi soprassuoli erano a loro volta derivati dall'attività antropica; anche in questo caso non si tratta, quindi, di una vera e propria modificazione della vegetazione naturale.

Nelle cenosi vegetali le cause che stanno portando alla possibilità di alterazioni sono essenzialmente riferibili a: (1) acidificazione del suolo (vengono favorite le specie più acidofile), (2) accumulo di azoto (con conseguente incremento nelle specie nitrofile), (3) accumulo di elementi fitotossici (in particolare alluminio e metalli pesanti). Questa terza causa è, attualmente, solo ipotizzata, in quanto i suoli riescono ancora a bloccare questi ioni in forme non biologicamente attive; il rischio è che l'incremento nell'inquinamento

e/o l'alterarsi delle condizioni ambientali possa in un futuro più o meno prossimo rendere biodisponibili questi elementi: si tratta di una vera e propria bomba ecologica, data la loro elevata tossicità e, soprattutto, considerati i rischi legati ad una loro possibile azione mutagena.

Fra le segnalazioni di alterazioni già in corso, è stato rilevato un incremento nella frequenza di indicatori di acidità nelle faggete della Westfalia; nei querceti della Svezia meridionale è stato constatato l'aumento di specie nitrofile e un corrispondente decremento in altre specie meno esigenti. Così, diverse brughiere olandesi stanno evolvendo verso cenosi a prato, soprattutto a causa della maggiore diffusione di graminacee.

Sono ancora pochi i dati disponibili, ed essi interessano gli ecosistemi più delicati; si possono considerare ancora come dei primi segnali che indicano però che l'inquinamento atmosferico è ormai divenuto un fattore di pressione capace di provocare modificazioni globali su larga scala nel mondo vegetale.

I «danni di nuovo tipo» ed il deperimento delle piante forestali

Il deperimento del bosco in Italia è stato inizialmente rilevato, come nell'Europa centro-settentrionale, a carico dell'abete bianco fin dall'inizio degli anni '70.

La sintomatologia del deperimento presenta di frequente carattere non specifico e può essere assimilata a forme generiche di stress, in particolare quello idrico. Tuttavia, essa si differenzia da questo per il suo carattere «massivo». Infatti: (a) la stessa specie mostra la medesima sintomatologia in stazioni geograficamente ed ecologicamente molto diverse, indipendentemente dall'età e dalla forma di governo e trattamento dei soprassuoli; ne sono interessati estesi soprassuoli, anziché singole piante poste in condizioni svantaggiate; (b) nella stessa stazione mostrano segni di deperimento tutte le specie presenti, indipendentemente dal loro temperamento ecologico.

Premesse queste considerazioni, possiamo cercare di individuare alcuni tratti comuni nella sintomatologia delle specie mediterranee. Occorre sottolineare che si tratta talora di manifestazioni stagionali, che pertanto possono sfuggire alla valutazione nelle indagini epidemiologiche. Per la loro definizione è necessario effettuare osservazioni ripetute e sistematiche in «aree fisse», su piante di cui sia conosciuta la storia.

La riduzione della chioma è dovuta molto spesso ad alterazioni del modello di ramificazione (getti raccorciati e con poche foglie, gemme abortite, rametti abscissi, sviluppo di gemme soppresse e/o proventizie, disseccamento

di rametti) piuttosto che ad una perdita anticipata delle foglie. Ciò è valido non solo per le specie caducifoglie ma anche per le sempreverdi (ed in particolare le querce sclerofille mediterranee) per le quali il termine *perdita di foglie* può essere usato più appropriatamente. La dinamica della progressione dei sintomi sulla chioma appare in ogni caso legata alla specie. In molti casi essa procede dall'alto verso il basso, come, per esempio, pressoché in tutte le latifoglie, mentre nei pini tale comportamento appare differenziato. Alterazioni della ramificazione sono, infatti, presenti anche su piante del genere *Pinus*, per le quali riveste un ruolo importante pure la microfillia e l'effetto fioritura patologico.

Grande importanza assumono le fioriture. Nei pini l'effetto fioritura è un sintomo che, grazie al caratteristico aspetto ad «equiseto» che assumono i rametti, si mantiene visibile e valutabile in ogni periodo dell'anno. Tra le querce la fioritura ha grande rilevanza in *Quercus ilex*, in quanto prelude ad un ricambio completo delle foglie, ma anche nelle caducifoglie è osservabile, prima della fogliazione, in misura molto intensa. In *Ostrya carpinifolia* la fioritura e la successiva fruttificazione inibiscono la formazione delle foglie e, già all'inizio dell'estate, la chioma appare bruna: dal momento che si ha una mancanza pressoché totale di foglie, la colorazione è conferita dalle squame delle infruttescenze.

Fruttificazioni anomale e molto ravvicinate nel tempo sono state osservate anche su numerose specie montane, come *Picea abies*, *Abies alba* e *Fagus sylvatica*.

Le alterazioni cromatiche hanno un andamento molto diverso da specie a specie. Gli ingiallimenti sono diffusi in *Fagus sylvatica*, ma praticamente assenti nelle querce caducifoglie; in *Quercus ilex*, essi preludono alla caduta completa delle foglie in primavera e nei pini compaiono nei mesi invernali e, nei casi meno gravi, sono reversibili in primavera. *Robinia pseudoacacia*, *Populus* spp. e talvolta anche *Ostrya carpinifolia* ingialliscono e perdono le foglie durante l'estate.

L'arricciamento delle foglie è un carattere comune a tutte le latifoglie decidue ma può presentarsi anche su *Quercus ilex*.

Di seguito riportiamo in maniera sintetica gli aspetti caratterizzanti della risposta delle principali specie forestali del bacino mediterraneo al fenomeno in questione.

Abete bianco

Il deperimento è stato osservato per la prima volta in Italia all'inizio degli anni '70 nelle foreste Casentinesi (Appennino Tosco-Emiliano). Nel de-

cennio successivo la «malattia» si cronicizzava: molte piante, già quasi completamente defogliate, formavano una *chioma di sostituzione*, ripristinando — parzialmente — la funzionalità dell'albero. Tipicamente, il quadro patologico ha inizio con una minor permanenza degli aghi sui rami: la defogliazione procede dal basso verso l'alto e dall'interno verso l'esterno, cosicché rimane non danneggiata solo la parte apicale della chioma. Gli aghi possono cadere ancora verdi, oppure in seguito ad intensi ingiallimenti che si manifestano nel periodo primaverile. Le piante deperienti arrestano la crescita longitudinale prima del raggiungimento della maturità fisiologica, formando così, in età ancora giovane, il cosiddetto «nido di cicogna», i cui rami, anche su piante molto deperienti, restano verdi. Successivamente, si ha il disseccamento dei rami, che possono morire prima ancora di aver perduto tutte le foglie. Le piante, anche ridotte in estreme condizioni di deperimento, possono emettere «rami di sostituzione» da gemme sopresse disposte lungo il fusto ed i rami principali. I rami di sostituzione, anche se inseriti su rami quasi completamente spogli, mostrano in genere un ottimo vigore vegetativo e sono ben ricoperti di aghi di colore normale.

La provenienza di Serra San Bruno (Calabria) ha mostrato una spiccata resistenza al deperimento. Le ipotesi proposte per spiegare questo comportamento sono riferite a: (a) la maggiore ricchezza e variabilità genetica delle popolazioni meridionali, che le rende più plastiche ed adattabili a condizioni ambientali critiche; (b) il fatto che nella zona d'indigenato sono presenti alcuni vulcani ha provocato nelle epoche passate una maggiore ricchezza di composti dello zolfo nell'atmosfera, e ciò può aver consentito la selezione di ecotipi adattati a questo tipo di stress; (c) gli adattamenti xerofili costituiscono una difesa anche nei confronti delle impurità dell'atmosfera.

Abete rosso

A livello europeo questa è la specie più studiata nell'ambito del «deperimento del bosco», a causa sia della sua diffusione che dell'importanza economica. La sintomatologia è stata descritta molto approfonditamente e comprende:

(a) diradamento della chioma per caduta anticipata degli aghi delle annate più vecchie. I rami principali e secondari si presentano spogli a tratti o con aghi presenti solo alle estremità. Nel tipo morfologico a rametti penduli, questi ultimi assumono un caratteristico aspetto a «scovolino» (sindrome *spaghetto*, o *dei fili d'argento*). La chioma non appare più compatta ma, in trasparenza, essa è caratterizzata dall'apertura di numerose «finestre».

Nel tipo morfologico con rametti appiattiti (abete rosso *a spazzola*) si assiste ad una progressiva riduzione della densità di tutta la chioma.

(b) rigenerazione della chioma per mezzo di rametti secondari da gemme sopresse.

(c) ingiallimento degli aghi, generalmente collegato a squilibri nello stato nutrizionale o all'azione diretta di inquinanti atmosferici (soprattutto ozono). Gli squilibri nutrizionali possono essere considerati, a loro volta, come manifestazione indiretta dell'inquinamento atmosferico, in quanto conseguenza del lisciviamento di nutrienti dalle foglie o di alterazioni a livello edafico dovute all'acidificazione del terreno. Le carenze nutrizionali provocano ingiallimenti specifici; quella di magnesio colpisce gli aghi più vecchi, soprattutto sulla faccia adassiale dei rametti, quella cioè maggiormente esposta alla luce. Questa manifestazione, che provoca il diradamento precoce della chioma al di sotto della cima (che rimane verde e apparentemente sana), viene considerata come sintomo dei danni di nuovo tipo causati dalle immissioni chimiche. Un effetto simile, ma con tonalità di giallo più intensa e frequenti imbrunimenti, è dovuto alla carenza di potassio. La carenza di manganese e ferro (e la clorosi da calcare) sono evidenziate, invece, da clorosi color giallo chiaro sugli aghi dell'ultimo anno; la carenza di azoto provoca l'ingiallimento delle foglie di tutto il rametto. L'effetto dell'ozono, riprodotto anche sperimentalmente, consiste inizialmente nella comparsa di aree clorotiche puntiformi.

Larice

Essendo questa una specie decidua, il deperimento non può manifestarsi, come nelle altre conifere, con una caduta anticipata degli aghi, ma mostra una sintomatologia che in parte può essere assimilata a quella delle latifoglie. La riduzione della chioma è dovuta al deperimento dei rami secondari per la perdita di vitalità dei germogli. I ciuffetti di aghi, di conseguenza, si concentrano nella parte apicale del rametto, o non si sviluppano affatto, provocandone il disseccamento e la caduta. Gli aghi possono virare la loro colorazione verso tonalità giallastre o brunastre, anche in seguito a carenze nutrizionali.

Pino silvestre

Questa è considerata una specie molto sensibile all'inquinamento atmosferico, soprattutto all'ozono ed agli altri fotossidanti, tanto che viene proposto come un indicatore biologico della qualità dell'aria. Il deperimento si

manifesta con la caduta anticipata degli aghi su tutta la chioma: le piante sofferenti mostrano spesso solo aghi dell'ultimo anno. Gli aghi ed i germogli, inoltre, possono essere raccorciati e può verificarsi la presenza di rametti secchi anche nella parte esterna della chioma. Sono pure frequenti ingiallimenti degli aghi causati dall'ozono o associati a carenze nutrizionali. Tali ingiallimenti non devono essere confusi con quelli dovuti alla «clorosi da calcare» in quanto compaiono in tutte le situazioni edafiche, sia su substrati calcarei che non.

Pino nero

I sintomi si manifestano con la rarefazione della chioma per la perdita anticipata di intere annate di aghi. La presenza di getti raccorciati comporta che gli aghi, di lunghezza minore del normale (microfillia), siano raggruppati in spazi molto brevi, conferendo alla chioma una tipica forma, non più compatta ma a «ciuffetti» separati ed isolati fra loro. Gli ingiallimenti, pur non interessando tutte le piante in deperimento, si manifestano in maniera improvvisa e normalmente sono estesi sull'intera chioma. Essi sono più acuti nei mesi invernali. Gli individui meno danneggiati recuperano in primavera la loro colorazione normale; nei casi più gravi sono invece irreversibili e la situazione si aggrava nel tempo. Nei boschi più colpiti si sono osservati estesi attacchi secondari di parassiti fungini (tra cui *Diplodia pinea*), che provocano disseccamenti molto estesi e possono portare alla morte le piante più compromesse.

Pino domestico

Pinus pinea è molto sensibile alla contaminazione ambientale. Sono conosciuti i danni da fluoruri; inoltre numerose pinete poste lungo le coste sono interessate da un vasto fenomeno di deperimento causato dall'esposizione agli aerosol marini inquinati. Anche per quanto riguarda i danni di «nuovo tipo», questa specie si è dimostrata sensibile. Il deperimento ha inizio con l'ingiallimento della chioma, che si verifica soprattutto durante i mesi invernali ed interessa all'inizio la porzione più bassa. Gli aghi ingialliti vengono persi all'inizio della primavera, in corrispondenza dell'emissione dei nuovi getti. I rami apicali possono mantenere un buon vigore, ed in primavera possono produrre cacciate robuste con aghi pressoché normali; tuttavia, nei casi più gravi, l'ombrello è ridotto ad un sottile strato di aghi solo dell'ultimo anno (che risultano molto più corti del normale), portati alla sommità

dei rametti di allungamento, anch'essi raccorciati. Negli individui giovani, la cui chioma ha forma tondeggiante o globosa, i sintomi possono presentarsi in maniera analoga; altrimenti è possibile osservare una spiccata microfillia accompagnata dalla perdita degli aghi di età maggiore ad un anno. In questo caso non si ha disseccamento di rami e la chioma mantiene, almeno nella parte periferica, la conformazione originaria. Anche il colore risulta alterato: il fogliame perde l'originaria tonalità verde brillante per assumerne una verde giallastra o decisamente giallastra. La decolorazione avviene progressivamente ed interessa la chioma *in toto*. Notevole importanza può avere l'«effetto fioritura».

Pino marittimo

Pinus pinaster è meno sensibile di *Pinus pinea* all'inquinamento acuto, mentre appare suscettibile ai «danni di nuovo tipo». Come negli altri pini, questi effetti si manifestano principalmente con la riduzione della chioma per la perdita degli aghi più vecchi, che avviene, anche nelle piante isolate, dal basso verso l'alto, fino a provocare la completa defogliazione ed il disseccamento dei rami inferiori. Gli ingiallimenti sono molto frequenti, si presentano durante l'inverno ed interessano soprattutto la parte inferiore della chioma (che dissecca e cade nella primavera successiva). Ingiallimenti cronici, localizzati «a chiazze», compaiono anche nella parte superiore della chioma. Molta importanza assume l'«effetto fioritura», che arriva ad interessare la totalità della chioma e può verificarsi anche in piante molto giovani.

Pino d'Aleppo

Anche in questo caso, i sintomi si manifestano in primo luogo come una riduzione di densità della chioma dovuta alla perdita degli aghi più vecchi; è difficile quantificare l'età degli aghi residui perché questa specie può produrre più di una cacciata in un anno. In questo modo i rametti non sono più rivestiti, ma resta visibile il grigio della corteccia: vista nell'insieme, la chioma perde il color verde brillante. Gli aghi appaiono decolorati e spesso di lunghezza inferiore al normale. Nei casi più gravi si può assistere al disseccamento di tutta o parte della chioma, che avviene generalmente a partire dall'alto.

Faggio

La perdita di chioma ha andamento basipeto e, come in tutte le latifoglie decidue, la «trasparenza» è definita essenzialmente dalla riduzione della ra-

mificazione. Le piante deperienti emettono in primavera un numero minore di rametti secondari a causa dell'abscissione o della perdita di vitalità delle gemme laterali; inoltre, i rametti che si sviluppano sono soprattutto dei brachiblasti. La ramificazione assume pertanto rapidamente la forma di *stabilizzazione* (secondo la terminologia di Thièbaut) o di *degenerazione* (secondo la terminologia di Roloff), caratterizzata dalla prevalenza dei brachiblasti; anche la gemma terminale può evolvere in un brachiblasto. Thièbaut distingue per il faggio due forme di sviluppo della ramificazione: di esplorazione, caratterizzata dalla preponderanza di macroblasti, e di sfruttamento, in cui le gemme dei rami secondari producono brachiblasti. In età avanzata lo sviluppo della ramificazione viene praticamente deputato ai soli brachiblasti. Anche Roloff propone un modello analogo, che viene esteso però anche alle tipologie presentate dalle ramificazioni delle piante stressate (forme di «*Stagnationsphase*» e di «*Resignationsphase*»). Nelle piante, anche giovani, ma che subiscono l'azione di stress ambientali si assiste ad una riduzione dell'accrescimento longitudinale nella ramificazione principale, accompagnata da una riduzione ancora più marcata della ramificazione secondaria e dalla prevalenza di brachiblasti. In tal modo i rami assumono le tipiche forme *a frusta* e *ad artiglio* che rendono riconoscibili le piante danneggiate anche nei mesi di riposo vegetativo.

È stato messo in evidenza da Roloff come gli episodi di siccità influiscano marcatamente sullo sviluppo longitudinale; tuttavia, nella successiva stagione vegetativa, i rami riprendono la ritmica normale se viene meno la carenza idrica. Se la pianta è, invece, già deperiente, la ripresa è più lenta o non avviene affatto. Nella parte esterna e superiore della chioma, e soprattutto nelle foglie di luce, avvengono inoltre modificazioni che completano il quadro patologico e, nel contesto ambientale della faggeta, assumono carattere massivo, contribuendo a modificare profondamente il suo aspetto. Esse sono: (a) carenatura delle foglie, o accartocciamenti, che consistono nel ripiegamento più o meno marcato della lamina fogliare lungo la nervatura principale, in modo che la pagina abassiale viene rivolta verso l'alto; (b) alterazioni cromatiche. Le foglie alterate (sia per arricciamenti che per viraggi di colore) hanno una minore vitalità e, già alla fine dell'estate, vengono abscisse, con circa un mese di anticipo sui normali cicli vegetativi.

Querce caducifoglie

Il deperimento delle querce caducifoglie, già descritto per le specie tipiche dell'Europa centrale (*Quercus robur* e *Q. petraea*), è presente in Italia

ed è sotto osservazione dall'inizio degli anni '80. Come nelle altre latifoglie decidue, la perdita di chioma non va considerata come la conseguenza di una defogliazione precoce, bensì come l'effetto di una serie di modifiche alla struttura della ramificazione. Grazie a tali modifiche, le piante danneggiate sono riconoscibili pure in *habitus* invernale. Per comprendere il significato di queste alterazioni occorre tener presente che nelle querce l'accrescimento longitudinale dei rami è legato, oltre che alla gemma apicale, anche alla germogliazione di una rosetta di gemme subapicali (4-5), il che conferisce il tipico aspetto «frondoso» alla ramificazione. Tuttavia, solo alcuni di questi germogli saranno mantenuti negli anni; infatti, tipica è la *cladotosi*, ovvero l'abscissione di rametti giovani. Si tratta di un fenomeno naturale che però appare più accentuato nelle piante deperienti. In questi casi i rami appaiono spogli per gran parte della lunghezza, con la presenza di numerose cicatrici ed aree di abscissione; i rametti sono invece concentrati nella zona apicale ma sono spesso rappresentati da soli brachiblasti che portano ciuffetti di foglie, spesso di dimensioni ridotte.

Roloff, analogamente a quanto descritto per *Fagus sylvatica*, definisce anche per *Q. petraea* e *Q. robur* un'evoluzione patologica dei processi di ramificazione. Anche in queste due specie le piante deperienti acquistano ben presto una ramificazione con vistosi pennelli formati da un asse principale e lateralmente soli brachiblasti (*Stagnationsphase*); successivamente la chioma può suddividersi e frammentarsi in singole porzioni corrispondenti ai rami principali per la morte dei getti terminali (*Resignationsphase*). Roloff sottolinea come queste fasi appaiono più accentuate nella farnia a causa della quasi totale assenza del picciolo fogliare che fa risaltare le strutture a pennello.

Quanto osservato su *Q. pubescens* e *Q. cerris* collima con la descrizione compiuta da Roloff per farnia e rovere. In tal modo anche nelle querce caducifoglie mediterranee sono riconoscibili, nell'architettura della ramificazione, le diverse fasi descritte dall'autore sopra citato.

Frequente è pure il fenomeno della *reiterazione*, ovvero l'emissione di rami per mezzo dei quali la pianta tenta di ricostituire una chioma. Nelle querce esaminate questo fenomeno è legato soprattutto all'emissione di rami epicormici e allo sviluppo di cacciate tardive. Questi rametti sono riconoscibili perché hanno un'età inferiore rispetto alla porzione di ramo sulla quale sono inseriti. Essi, avvolgendo il ramo con getti di nuova formazione, contribuiscono a conferirgli un caratteristico aspetto «a manicotto».

Nelle querce caducifoglie sono frequenti disseccamenti apicali di rametti e di rami principali. In questo caso non ci riferiremo a forme note di cladotosi (per es., in farnia non è infrequente l'abscissione del getto terminale),

ma ad un differente comportamento riscontrabile fra individui sani ed individui deperienti. Un altro sintomo visibile è costituito dagli *arricciamenti*, cioè dal ripiegamento su se stessa della lamina fogliare in modo che viene mostrata solo la pagina abassiale. Essi sono accompagnati dalla *torsione del picciolo*, così che la chioma finisce per assumere una colorazione diversa (verde-grigiastra) dalla norma. Tali alterazioni cromatiche non hanno, finora, un carattere massivo. Si tratta di pochi casi di ingiallimento di individui fortemente deperienti, o di arrossamento delle foglie più alte ed esterne. Verso il termine della stagione vegetativa si osserva, invece, un più precoce ingiallimento e disseccamento delle foglie, che già a metà settembre cominciano ad assumere l'aspetto autunnale.

Il deperimento delle querce caducifoglie in Italia può essere ricollegato al problema più generale dell'*oak decline* descritto nell'Europa centro-orientale. Si tratta di una patologia complessa, nella quale intervengono numerosi stress ambientali e agenti patogeni secondari, ma nella quale il ruolo decisivo è riconosciuto da molti all'inquinamento atmosferico.

Leccio

Il deperimento ha spesso inizio con la torsione del picciolo delle foglie di luce, cui segue la rarefazione della parte superiore della chioma. Durante la stagione invernale si osservano ingiallimenti diffusi; le foglie clorotiche virano di colore all'inizio della primavera, assumendo tonalità brune e rossastre e conferendo alla chioma nella sua globalità un aspetto bronzeeo. Si tratta di un sintomo caratteristico e ben riconoscibile nelle piante in bosco. Tali foglie cadono nel mese di maggio, in corrispondenza della fioritura. Negli individui più danneggiati i rametti della parte superiore della chioma perdono tutte le foglie non appena diventano evidenti le strutture fiorali. In tal modo, per alcuni giorni, si ha una porzione di chioma completamente spoglia, che viene successivamente rivestita da amenti maschili.

La fioritura maschile è particolarmente abbondante nelle piante maggiormente deperienti. In un momento immediatamente successivo, si ha l'emissione delle nuove foglioline. In tal modo la pianta ricostruisce una chioma completamente nuova assumendo un comportamento non più da sempreverde, bensì da pianta a foglia semipersistente.

L'*habitus* di un leccio deperiente nel periodo estivo-autunnale è caratterizzato dalla presenza, nella parte superiore della chioma, di rametti spogli che mantengono solo un ciuffo di foglie sull'ultimo flusso di crescita. Tale flusso si presenta in genere molto raccorciato cosicché la chioma, da com-

patta come è nelle piante sane, si presenta frammentata in numerosi ciuffetti portati all'apice dei rametti.

Le alterazioni microscopiche

La casistica riportata ha messo in evidenza le alterazioni macroscopiche a cui vanno incontro le piante deperienti. I danni a livello citoistologico sono meno specie-specifici e spesso mostrano analogie con gli effetti causati da episodi di inquinamento acuto. Tuttavia, il quadro patognomico che se ne ricava è molto complesso ed ha richiesto, fin dai primi momenti, un approccio di tipo interdisciplinare. Per tale motivo, accanto a ricerche di tipo epidemiologico, fisiologico e incrementale, sono state condotte approfondite indagini a livello isto-anatomico. In particolare, si è andata progressivamente ampliando la metodologia dell'analisi microscopica integrata, che consiste nell'osservare lo stesso campione con diverse tecniche (microscopia ottica, elettronica a trasmissione, TEM e a scansione, SEM) al fine di avere un quadro conoscitivo il più completo possibile.

L'inquinamento atmosferico diffuso agisce direttamente o indirettamente su tutti gli organi ed i tessuti della pianta, ma alcuni di essi appaiono un bersaglio decisamente più caratteristico. Gli organi più colpiti risultano le foglie, ma si hanno lesioni anche a carico delle radici, specialmente di quelle fini, dei frutti e degli organi riproduttivi.

Molti autori hanno evidenziato un'influenza degli inquinanti sull'epidermide fogliare. In particolare, si assiste alla modificazione dello strato cuticolare con una perdita di spessore della parte reticolare ed un aumento della permeabilità. Questo si riflette anche sulla vitalità e funzionalità delle cellule epidermiche che, ad esempio, sotto l'azione di piogge acide, tendono a crollare.

Frequentemente sono state osservate alterazioni e riduzioni delle cere epicutcolari. Il parenchima a palizzata viene anch'esso particolarmente colpito. Le cellule che lo compongono tendono a rigonfiarsi e a distaccarsi le une dalle altre. In questo tessuto si osservano anche numerose altre alterazioni: un sintomo molto importante è quello osservato a carico dei cloroplasti. In essi si ha l'alterazione delle membrane tilacoidali, che subiscono una degenerazione lipidica, con formazione di gocce osmiofile (plastoglobuli). In taluni casi le membrane tilacoidali subiscono rigonfiamenti e perdono la loro funzionalità. Sempre a carico dei cloroplasti è stato osservato l'accumulo di amido, legato spesso a problemi di traslocazione. Intorno ai cloroplasti danneggiati si ha anche una modificazione sia numerica che strutturale dei

mitocondri. Questo induce a pensare ad un'alterazione del rapporto respirazione/fotosintesi.

Interessanti sono poi le alterazioni che vengono riscontrate a carico del cilindro centrale della foglia. La guaina del fascio, importante tessuto di selezione e collegamento, viene colpita, sia dal punto di vista della vitalità delle cellule che la compongono, sia per la delignificazione delle bande presenti sulle pareti radiali. Tutto ciò cambia in senso negativo il sistema di scambio tra mesofillo e vasi conduttori.

Una delle più diffuse alterazioni del cilindro, riscontrata in tutte le foglie di conifere osservate ed in alcune latifoglie, è quella a carico del floema. Il tessuto cribroso è soggetto nelle foglie persistenti ad un progressivo e naturale collassamento delle cellule più vecchie che vengono sostituite da quelle prodotte dal cambio con azione monopleurica. Negli aghi soggetti all'azione degli inquinanti, specialmente precipitazioni acide, la porzione di cribro schiacciata aumenta progressivamente, fino ad annullare il trasporto degli elaborati dalla foglia alle altre parti della pianta. Anche se il meccanismo non è ancora del tutto chiarito, tale fenomeno può essere imputato al sinergismo fra due cause: perdita di elasticità delle cellule floematiche e alterazioni del cambio intervasale.

Anomalie a carico della traslocazione e della respirazione, determinate dall'azione di inquinanti atmosferici, appaiono essere responsabili dell'eccessivo accumulo di cristalli di ossalato di calcio sull'esterno delle pareti del mesofillo, specialmente nel parenchima lacunoso.

Sempre a livello fogliare, un bersaglio particolarmente sensibile all'azione degli inquinanti si è dimostrato l'apparato stomatico. In esso le alterazioni sono di vario tipo e coinvolgono sia le cere di protezione della camera prestomatica (nelle conifere), sia la dinamica della lignina delle pareti, sia, infine, la vitalità delle cellule di guardia e di quelle compagne. Nelle cellule di tutti i tessuti fogliari danneggiati è stato inoltre riscontrato un anomalo accumulo nel vacuolo di composti fenolici, che indicherebbe una degenerazione di organuli.

Meno studiati, ma altrettanto importanti, sono i danni a livello dell'apparato radicale. In particolare, le più colpite appaiono le radici fini, nelle quali viene anche modificato il legname simbiotico con i funghi micorrizici. Le alterazioni strutturali delle radici inducono, da un lato una maggiore suscettibilità ai patogeni presenti nel suolo, e dall'altro una diminuzione della capacità di assorbire acqua e sostanze nutritive.

Lo studio anatomico è stato sempre più considerato come lo strumento indispensabile per una diagnosi precoce e differenziale degli effetti dell'in-

quinamento atmosferico. Questo soprattutto perché le manifestazioni esterne del deperimento si hanno dopo vari anni, nei quali già si possono osservare modificazioni anatomiche. In alcuni casi, poi, è possibile individuare, se non l'inquinante, almeno il gruppo di sostanze che hanno determinato quel particolare danno.

Gli effetti della vegetazione sull'atmosfera

Le piante e l'ambiente in cui esse vivono sono intimamente accoppiate in un sistema di mutue interazioni. Le condizioni ambientali (in termini di disponibilità di luce, acqua e CO_2 , regime termico, ecc.) determinano, infatti, la possibilità della vita e regolano il funzionamento dei vegetali; tuttavia, la vegetazione e la biosfera, più in generale, non subiscono soltanto passivamente l'influenza dell'ambiente ma provocano delle retroazioni che tendono in qualche misura a modificare alcuni parametri di quest'ultimo.

Queste interazioni tra vegetazione e ambiente sono molteplici e complesse (interessando in maniera intrecciata sia parametri fisici che biologici di quest'ultimo) e si realizzano a scale di tempo e di spazio molto espanse.

L'ambiente antropizzato e quello urbano in particolare esercita sulla vita delle piante una pressione ancora più forte a causa delle condizioni spesso veramente inospitali dovute agli alti tassi d'inquinamento. Tuttavia anche in tali circostanze, le piante grazie a diversità genetica e adattabilità individuale riescono a svolgere ugualmente le loro funzioni.

La loro presenza in ambienti urbani è particolarmente utile non solo per i non trascurabili aspetti estetici e psicologici, ma anche perché possono contribuire attivamente a mitigare alcuni effetti negativi dovuti sia all'inquinamento che a certe caratteristiche intrinseche delle architetture delle nostre città.

I principali parametri fisici dell'ambiente che la vegetazione interviene a modificare possono essere così elencati:

- regime radiativo
- temperatura ed umidità dell'aria

* I.A.T.A.-C.N.R., Firenze.

- regime dei venti
- precipitazioni al suolo
- contenuto atmosferico in O_2 e CO_2
- contenuto in polveri e sostanze inquinanti.

Effetti sul regime radiativo

Se, in prima approssimazione, può essere considerato trascurabile l'effetto della vegetazione sulla quantità e qualità della radiazione in arrivo dal Sole e dall'atmosfera, la presenza di copertura vegetale modifica in maniera considerevole sia la percentuale dell'energia incidente che viene riflessa (albedo) sia l'entità della radiazione emessa proprio dalle diverse superfici. Mentre infatti una copertura vegetale riflette, nell'intera banda dal visibile all'infrarosso, circa il 25-30% della radiazione incidente, tale percentuale si abbassa al 14% per una superficie urbanizzata. Ovviamente tale parametro presenta per le superfici vegetate una non trascurabile dinamica in relazione sia al loro grado di copertura che al loro stato di salute.

L'entità della radiazione emessa dai corpi è funzione della loro temperatura superficiale e quindi del loro diverso comportamento nell'utilizzare l'energia incidente. Per grandi linee questa quantità è considerevolmente minore per le superfici coperte da vegetazione rispetto a corpi inerti quali fabbricati o strade. In quest'ultimi l'energia assorbita viene convertita quasi completamente in calore sensibile e contribuisce ad innalzare la temperatura di questi corpi e quella dell'ambiente circostante.

In aree urbanizzate è stato verificato che gli inquinanti atmosferici operano, inoltre, un effetto serra sulla radiazione in uscita dal sistema accrescendo il carico energetico in misura maggiore rispetto a quello di ambienti rurali. Questi processi stanno alla base della formazione dell'anomalia termica nota come *isola di calore*.

Effetti su temperatura e umidità dell'aria

La vegetazione agisce su questi due parametri ambientali sostanzialmente attraverso il processo della traspirazione, ovvero alla vaporizzazione dell'acqua liquida che avviene a livello dei tessuti della foglia. Come è noto tale passaggio di stato dell'acqua avviene se è disponibile una non trascurabile quantità di energia, circa 2.454 MJ per kg di acqua. Nel caso specifico tale

energia viene fornita dai tessuti delle foglie che di conseguenza tendono ad abbassare la loro temperatura.

Una coltura di mais che traspira 400 l di acqua m^{-2} nell'arco del suo ciclo dissipa sotto forma di calore «latente» una quantità di energia di circa 980 MJ m^{-2} pari circa al 35% della quantità complessiva di energia solare incidente nei 120 giorni del suo ciclo. Per colture più dense e più attivamente traspiranti la percentuale di energia incidente dirottata verso impieghi che non provochino innalzamenti della temperatura dell'aria ambiente presenta valori ancora maggiori.

Per gli stessi motivi la presenza di vegetazione influenza la rapidità con cui si verificano variazioni della temperatura ambiente. La vegetazione, rispetto ad altri corpi, presenta infatti una minore conducibilità termica e ciò fa sì che le aree rurali siano caratterizzate da una maggiore stabilità termica essendo necessarie maggiori quantità di calore per modificarne la temperatura rispetto ad aree urbanizzate.

Se è evidente l'effetto mitigante della vegetazione sulla formazione di isole di calore, e sui loro effetti, più complesso è stabilire le dimensioni dell'area che può beneficiare da una «cella unitaria» di verde; recenti ricerche condotte in Germania hanno permesso di verificare che l'effetto mitigante di parchi di 30 e 200 ha si estendeva rispettivamente fino a 300 e 900 m. Tuttavia non trascurabile risulta anche l'effetto di «microinterventi» realizzati a livello di singolo giardino condominiale il cui «inverdimento» ha comunque benefici effetti soprattutto sul microclima radiativo.

La presenza di vegetazione produce inoltre un aumento dell'umidità dell'aria sia in termini di umidità assoluta, per effetto della traspirazione, che di quella relativa dovuta all'abbassamento della temperatura ambiente.

Modifiche del regime del vento

In questo caso la vegetazione esplica il suo effetto mediante un'azione di tipo meccanico, di ostacolo al movimento dell'aria. Lo smorzamento della velocità del vento avviene sia lungo il profilo verticale del manto vegetale sia nelle vicinanze di questo. L'aria in movimento sopra una copertura vegetale subisce da parte di quest'ultima un'azione di rallentamento che aumenta al crescere della densità e compattezza del manto vegetale e lungo il profilo verticale in direzione del terreno.

Tale effetto è sfruttato per la difesa dal vento realizzata mediante barriere vive. L'effetto frangivento risulta apprezzato non solo in zone agricole

ma anche nelle aree urbane dove molto spesso le architetture realizzate, sottovalutando considerazioni di tipo micrometeorologico, danno luogo a veri e propri «canyon» dove l'aria in moto viene accelerata non trovando ostacoli che la rallentino.

Se questo è senza dubbio l'effetto più evidente, recentemente è stato descritto un effetto indiretto che merita di essere menzionato soprattutto perché si riferisce a possibili alterazioni dovute alle modifiche dell'ambiente dovute come abbiamo visto il regime radiativo e termico di ampie superfici creando le condizioni per l'instaurarsi di gradienti orizzontali di temperatura che danno origine a venti locali: le cosiddette *brezze da isola di calore*.

Effetti sulle precipitazioni

La vegetazione intercetta le precipitazioni nelle loro diverse forme di pioggia, neve e grandine e può agire da superficie di condensazione di rugiada e brina. La capacità di trattenere acqua varia in funzione del tipo di copertura vegetale, della sua densità e stadio di sviluppo. La pioggia temporaneamente trattenuta sulle superfici fogliari viene successivamente evaporata nell'atmosfera mentre quella in eccesso alla capacità di trattenuta sulle foglie cola lungo i piccioli ed i fusti fino al suolo. L'entità di questa percolazione lungo il fusto può arrivare al 20% della pioggia netta creando una concentrazione di umidità nel terreno immediatamente circostante il fusto. La percentuale di pioggia persa per intercettazione con la superficie delle foglie varia dal 15 al 40% delle precipitazioni annue in foreste di conifere e dal 10 al 15% in boschi decidui. Per le conifere la percentuale sopra indicata si mantiene valida anche per le precipitazioni nevose.

In condizioni di alta umidità atmosferica, goccioline di acqua possono condensarsi sulle superfici vegetali dando luogo ad una vera e propria precipitazione occulta. Lo stesso dicasi per quanto concerne la rugiada (condensazione di gocce d'acqua quando per effetto del raffreddamento notturno la temperatura delle superfici scende al di sotto della temperatura di rugiada) che può ammontare fino a 0,5 mm per notte.

La presenza della vegetazione tende a modificare anche l'energia con cui la pioggia o altre meteore raggiungono il suolo. Questo aspetto riveste una notevole importanza dal punto di vista della conservazione del suolo (e della sua notevole importanza dal punto di vista della conservazione del suolo) (e della sua fertilità) e della salvaguardia ambientale particolarmente per un paese come il nostro caratterizzato da un'alta percentuale di terreni in pendio.

Effetti sulla concentrazione atmosferica in O_2 e CO_2

La presenza di copertura vegetale comporta, come conseguenza del processo fotosintetico di assimilazione, una riduzione delle concentrazioni di anidride carbonica atmosferica ed una parallela produzione di ossigeno.

La continua immissione di ossigeno nell'atmosfera da parte delle piante ha prodotto un bilancio netto in attivo fino all'inizio dell'era industriale. La combustione di riserve fossili ha prodotto un rapido incremento del consumo di O_2 associato peraltro ad un aumento dell'immissione di CO_2 ed altri residui.

Per quantificare l'entità di tale contributo si pensi che mentre un uomo adulto consuma in un anno 330 kg di ossigeno (a fronte dei 3300 kg di un autoveicolo che percorra 10000 km nello stesso tempo), un ettaro di foresta è in grado di liberare annualmente 4400 kg di ossigeno.

Come già accennato la vegetazione gioca una funzione importante anche nella regolazione della concentrazione atmosferica di anidride carbonica; questa caratteristica può rivestire un ruolo positivo al fine di attenuare le crescenti concentrazioni di questo gas, particolarmente in zone urbane e durante periodi di calma atmosferica.

Per quantificare l'effetto di abbattimento sulle concentrazioni di CO_2 possiamo far riferimento ad uno studio effettuato in U.S.A. relativo alla determinazione del numero di ettari di bosco da impiantare al fine di assorbire gli incrementi previsti nelle immissioni di CO_2 ; prevedendo per il periodo 1987-1996 un aumento del fabbisogno di energia elettrica pari a $25223 \cdot 10^9$ W da ottenersi con l'impiego di combustibili fossili, ne conseguirebbe un incremento annuo di 45.000.000 t di CO_2 immessa nell'atmosfera. Supponendo un tasso di fissazione del carbonio da parte del bosco pari a $5 \text{ t ha}^{-1} \text{ anno}^{-1}$, si deduceva che sarebbero stati sufficienti 9 milioni di ettari, per neutralizzare tali incrementi di CO_2 atmosferica.

Abbattimento di polveri e sostanze inquinanti

La vegetazione può contribuire all'eliminazione di una parte delle sostanze inquinanti dell'atmosfera, interagendo con esse e disattivandole secondo vari procedimenti di assorbimento e adsorbimento.

Il primo fattore necessario a questa inattivazione è il contatto vegetazione-atmosfera; questo contatto può essere più o meno favorito dalle condizioni atmosferiche o dalla densità delle foglie che possono ostacolare la penetra-

zione dell'aria sia all'interno delle chiome delle alberature che all'interno di colture erbacee.

I meccanismi con cui la vegetazione può sottrarre inquinanti all'atmosfera sono i seguenti: inattivazione superficiale a livello del tegumento, inattivazione interna, precipitazione delle sostanze inquinanti in composti non nocivi all'interno dei propri tessuti, oppure loro utilizzazione per il proprio metabolismo.

All'interno dei tessuti, le piante possono, poi, diminuire in vario modo la concentrazione degli inquinanti, sia diluendoli nell'aumento del volume dei tessuti, sia accumulandoli in parti che poi verranno eliminate, come le foglie.

Queste modalità di inattivazione, essendo basate su reazioni chimiche, sono legate principalmente alla temperatura dell'aria ed al raggiungimento di determinati livelli soglia di radiazione solare, che fornisce l'energia per le reazioni e provoca l'apertura degli stomi.

L'ozono e l'anidride solforosa ad esempio possono essere inattivati già a livello della cuticola. Tale azione può essere esaltata dalla presenza di peli o comunque da tutte quelle condizioni che tendono ad aumentare la superficie vegetale esposta.

Le sostanze inquinanti penetrano nelle piante principalmente attraverso gli stomi, ma anche attraverso le lenticelle, la cuticola e le ferite. Una volta penetrate all'interno queste si disciolgono nei succhi intracellulari, dai quali possono venir dislocate in altre parti della pianta così come possono essere adsorbite dalle pareti cellulari e rimanere ferme. La velocità di assorbimento è funzione della solubilità di queste sostanze.

A parte il CO che non viene affatto assorbito, gli altri principali inquinanti sono più o meno solubili (il più solubile è l'HF, poi a scalare SO_2 , Cl_2 , NO_2 , O_3 , CO_2 , PAN o nitrato di perossiacetile e NO), e la loro quantità influenza la possibilità della pianta di trasformarli, inattivarli, metabolizzarli, traslocarli o semplicemente di rimetterli.

La riemissione può essere provocata dal modificarsi dei parametri meteorologici come la pressione e l'umidità relativa; un ruolo importante è poi quello svolto dalle precipitazioni per la loro azione di dilavamento. Questo fenomeno può portare addirittura all'aumento nella concentrazione degli inquinanti in zone chiuse quali boschi o serre, oppure le sostanze riemesse possono essere fotoridotte (SO_2 in H_2S meno tossica).

A livello dei tessuti F e O_3 vengono disattivati, in un precipitato il primo e in ossigeno il secondo, ridotto dai terpeni; sempre i tessuti possono metabolizzare l' SO_2 , i suoi derivati, il NO_2 e l'ammoniaca.

Il F atmosferico è accumulato principalmente nelle foglie (apici e mar-

gini), ma lo possiamo trovare anche nella corteccia specialmente dalla parte rivolta verso la fonte dell'inquinamento; per renderlo non tossico i tessuti vegetali lo elaborano o emettendo HF gassoso o perdendo F^- per dilavamento o fissandolo nel loro interno come CaF_2 (anche lo ione Mg^{2+} ha lo stesso effetto). Ciò può portare naturalmente ad una Ca-deficienza, ed a innumerevoli altri problemi dipendenti dall'eccessivo accumulo di F^- , ma in questa sede si vuole evidenziare le capacità della vegetazione di limitare l'inquinamento atmosferico piuttosto che evidenziare i danni di questo sulla vegetazione.

Attraverso questi meccanismi le piante sono in grado di contribuire alla depurazione dell'atmosfera dagli inquinanti. Del resto non sempre queste sostanze sono nocive alla vegetazione, anche se è così nella stragrande maggioranza dei casi, e talvolta moderate quantità possono sopperire alla mancanza di elementi nutritivi nel terreno e possono eliminare o inibire microorganismi parassiti della vegetazione e dell'uomo.

Più in generale esse sono dannose e provocano appassimenti causati da alterazioni alla membrana citoplasmatica, sottraggono per complessazione ioni metallici indispensabili provocando l'inibizione della fotosintesi, della sintesi proteica, lipidica ecc., possono modificare lo sviluppo vegetativo mediante produzione di pseudo-ormoni, danneggiando il polline e i pronubi e, in generale sfiniscono le piante che per difendersi sottraggono energia alle normali funzioni vitali.

Gli effetti dell'assorbimento degli inquinanti da parte delle piante dipendono: dal genere di aria inquinata, dalla concentrazione dell'inquinante, dalla durata del contatto, dal livello di suscettibilità delle piante, dal loro stato fisiologico e dalla disposizione degli organi assimilativi. I fattori più importanti sono la concentrazione dell'inquinante e la durata del contatto con la pianta.

È qui il caso di ricordare che l'accumulo degli inquinanti in parti della pianta spesso rappresenta un grande pericolo oltre che per la pianta stessa anche per chi se ne nutre, sia gli animali che l'uomo.

L'aria può essere inquinata non solo da gas velenosi, ma anche da polveri. La vegetazione arborea ed i boschi giocano un importante ruolo nella purificazione dell'aria; infatti le chiome alte e dense filtrano di fatto (oltre che l'inquinamento acustico) polvere e fuliggine. Questo filtro naturale viene rigenerato da ogni singola precipitazione e rinnovato, annualmente, con l'emissione del nuovo fogliame. Per dare un'indicazione dell'entità di tale effetto si pensi che boschi di abeti e pini possono arrivare ad adsorbire 30-35 t ha⁻¹ di polvere ogni anno, boschi di faggi anche il doppio.

Effetti della vegetazione sul rumore

Il rumore è un suono non desiderato che per le sue caratteristiche fisiche (livello di energia, frequenza, qualità) o per la periodicità di emissione genera fastidio, disagio e, anche, dolore.

Non esiste una soglia assoluta se non nel caso del dolore fisico. Lo stesso suono può risultare piacevole o fastidioso a seconda dello stato fisico o psichico del soggetto.

Si parla di inquinamento acustico quando ci si riferisce ad un suono sgradevole o doloroso derivato da attività antropiche. Le maggiori sorgenti di questa forma di inquinamento sono le industrie, i sistemi di trasporto su strada e su rotaia e gli aerei. Sono sorgenti costanti o periodiche, che emettono energia sonora con livelli di intensità e di qualità tali da provocare una serie di sindromi patologiche, dalla sfera della psiche alle lesioni citoistologiche dell'orecchio. Data la tipologia delle principali sorgenti di rumore, siamo in presenza di una forma di inquinamento che interessa con la stessa gravità sia gli ambienti urbani che i territori extraurbani.

La protezione da questa forma di inquinamento può essere compiuta direttamente sulle sorgenti di emissione tramite l'utilizzazione di tecnologie e materiali che abbiano o caratteristiche di minore fonoemittenza oppure che riescano a controllare il livello delle emissioni. Il problema della protezione dal rumore può però venire ribaltato riducendo la quantità e la qualità del suono che giunge sul bersaglio (abbattimento).

La ricerca nell'ambito di queste due problematiche avanza di pari passo perché l'una non nega l'altra e perché l'inquinamento da rumore spesso è

* Dipartimento di Biologia vegetale, Firenze.

la sommatoria dell'azione di numerosissime microsorgenti ciascuna delle quali sufficientemente «protetta» all'origine (ad esempio il traffico veicolare) ma che nell'insieme producono inquinamento.

La protezione nei confronti dei soggetti bersaglio è essenzialmente mirata all'abbattimento della quantità di rumore isolandolo dalla sorgente. Le ricerche sono partite dalla semplice osservazione che il rumore si attenua allontanandosi dalla sorgente oppure frapponendo uno schermo fra sorgente e bersaglio.

Sinteticamente la sperimentazione inerente l'attenuazione del rumore a livello del bersaglio è mirata a:

- 1) definire le grandezze acustiche,
- 2) analizzare l'azione dei fattori ambientali sulla propagazione del suono,
- 3) studiare le patologie da rumore,
- 4) valutare la tipologia dei sistemi di protezione (schermi).

I primi due filoni hanno un'importanza soprattutto a livello della misurazione delle grandezze e della fisica della diffusione dell'energia sonora e sono quindi «propedeutici» al problema centrale dell'effetto inquinamento in quanto necessari per poter misurare e quantificare tutto il fenomeno; il terzo filone è clinico e riguarda i rapporti fra livello dell'inquinamento e danni ai soggetti (principalmente l'uomo).

L'abbattimento tramite schermi può essere ottenuto con strutture che possono essere:

- rigide e passive (muri, pareti, terrapieni, strutture isolanti o fonosorbenti, etc.); in questo caso l'energia sonora viene per la maggior parte riflessa ma anche diffratta. L'assorbimento è funzione dei materiali usati;
- attive (barriere e siepi con piante vive); in questo caso l'energia sonora in parte viene riflessa e diffratta ma in parte viene assorbita nei tessuti vivi e successivamente dissipata sotto forma di calore;
- miste; consistono nell'abbinamento di schermi passivi e piante.

Questa analisi si pone l'obiettivo di valutare e discutere i risultati delle ricerche eseguite utilizzando schermi attivi nei riguardi soprattutto dell'inquinamento acustico provocato dal traffico automobilistico.

Le barriere vegetali

La capacità di abbattere il rumore da parte di una barriera vegetale è funzione di una serie di fattori legati alle caratteristiche fisiche del suono emesso, alla barriera (composizione, dimensioni, densità, fenologia, etc.), alle

condizioni meteorologiche dell'ambiente in cui si trova la barriera stessa e in cui si propagano le onde sonore (umidità, temperatura, vento, etc.), alla superficie del suolo (terroso, pietroso, inerbato, etc.), alla morfologia (pianeggiante, rilevata, edificata, etc.).

Le ricerche sulla capacità delle piante di attenuare il rumore sono indirizzate, in campo, a verificare la maggiore o minore efficacia di una barriera oppure, in ambiente controllato (soprattutto in camera anecoica), ad eliminare la maggior quantità possibile di interferenze. Ovviamente nel secondo caso, le dimensioni ridotte degli ambienti di solito limitano le possibilità del disegno sperimentale e dei protocolli stessi.

Il suolo può intervenire in maniera più o meno incisiva nell'attenuare il rumore; ciò dipende soprattutto dal tipo di copertura e dalla continuità o meno di essa. Le condizioni meteorologiche possono incrementare o ridurre l'efficacia dell'azione di abbattimento del rumore. Questi sono aspetti che devono quindi essere tenuti presenti quando si analizza la capacità di uno schermo vegetale nel ridurre un suono, in quanto possono influenzare anche notevolmente il risultato.

Le ricerche in campo con barriere vegetali spesso utilizzano, come sorgente sonora, il traffico «naturale» sia stradale che ferroviario. Le barriere saggiate possono essere strutture già esistenti sul luogo oppure vengono allestite appositamente delle barriere specifiche; si possono quindi avere differenze notevoli anche all'interno dello stesso disegno sperimentale.

I risultati ottenuti in ambiente controllato e su singole piante (o loro parti), a causa delle discordanze anche notevoli, parrebbero rendere estremamente difficile poter generalizzare il problema e definire un criterio di maggiore o minore affidabilità delle barriere composte da piante. Questa non ripetibilità fa sì che, benché i dati in letteratura siano ormai numerosi, i risultati non siano però agevolmente confrontabili fra di loro poiché non sono riproducibili le stesse condizioni sperimentali: spesso manca o è carente la tipicizzazione ambientale e, soprattutto, differiscono sia la componente acustica (intensità, frequenza, durata) sia quella vegetale (composizione, dimensioni e densità). Anche la strumentazione di rilevamento e i sistemi di analisi spesso si differenziano nelle diverse ricerche, non solo per il tipo di apparecchi di registrazione ma anche per il loro numero, la loro dislocazione ante e post barriera, l'altezza della registrazione, la qualità del rumore analizzabile, etc.

Malgrado queste difficoltà i dati esistenti sono sufficienti per definire un quadro delle potenzialità d'uso delle barriere vegetali in funzione dell'abbattimento dell'inquinamento da rumore.

In effetti sono stati messi a punto degli elenchi. Si tratta di liste ricavate da sperimentazioni mirate alla elaborazione di «classifiche di capacità» di barriere mono- o polispecifiche allestite ad hoc oppure già esistenti. Sono elenchi che perseguono delle finalità eminentemente applicative, però spesso tendono a generalizzare i loro contenuti perdendo così la rispondenza specifica.

La pianta interviene attivamente ad attenuare il suono tramite la corteccia, i rami e le foglie. Diverse esperienze in camera anecoica hanno messo in evidenza il ruolo giocato dalle foglie. A livello della chioma sappiamo ormai che le piante, almeno le latifoglie saggiate, attenuano soprattutto le alte frequenze (superiori a 1-2 kHz) mentre frequenze inferiori vengono meno influenzate. La maggior parte delle piante saggiate hanno le foglie lunghe una decina di centimetri e quindi il sistema ramo/foglia può facilmente intercettare suoni con frequenze comprese fra 2 e 4 kHz (cioè con lunghezze d'onda fra 16 e 8 cm). Purtroppo il traffico automobilistico emette suoni con frequenze soprattutto fra 250 e 2000 Hz quindi inferiori alle potenzialità ottimali delle piante.

Al di là delle differenze fra le specie e nelle differenti fasi fenologiche, le esperienze hanno permesso di evidenziare che una barriera in buone condizioni può, mediamente, produrre un'attenuazione del rumore di circa 0,3 dBA per metro di spessore in aggiunta all'abbattimento prodotto dal suolo, dalla distanza e dalla resistenza dell'aria. Questi valori sono riferiti a misure effettuate immediatamente a ridosso della barriera stessa; allontanandosi da essa l'effetto «attenuazione» si incrementa. Valori «normali» di abbattimento del suono sono intorno ai 2-5 dBA ad una decina di metri di distanza dallo schermo.

Più che la pianta «specialista» esiste la siepe o la barriera ben fatta. La morfologia della chioma delle piante da utilizzare ha, a parità di densità delle chiome e di dimensioni della barriera, un'influenza relativa anche se le dimensioni del tronco, la morfologia della corteccia e soprattutto le dimensioni delle foglie possono intervenire positivamente a livello di singole fasce di frequenze (come si è già sottolineato, le foglie interferiscono meglio con quelle frequenze che hanno lunghezze d'onda uguali alle loro dimensioni).

A questo proposito Cook e van Averbek molto pragmaticamente propongono una lista di alberi ed arbusti efficaci nell'abbattimento del rumore in funzione delle dimensioni che possono raggiungere e della densità della loro chioma. Si sottolinea anche il fatto che la capacità di chiudere completamente una determinata superficie tramite piante presenta il vantaggio di otte-

nere anche un'elevata azione di filtrazione degli inquinanti chimici, soprattutto di quelli particolati, che sono sempre molto abbondanti lungo gli assi stradali.

* * *

I risultati delle diverse sperimentazioni eseguite soprattutto a partire dagli anni '60 mostrano che, praticamente, tutte le specie a portamento arboreo o arbustivo possono ridurre l'inquinamento acustico. L'efficacia dipende dalla forma, dalle dimensioni e dalla densità delle barriere allestite. Aver potuto definire i vantaggi e i limiti delle barriere vegetali è solo una prima parte di questo filone di ricerca: è infatti necessario mettere a punto le tecniche colturali (per esempio il sesto d'impianto in funzione delle esigenze e degli spazi disponibili) e quantificare le capacità e le potenzialità a livello di specie o, meglio, di varietà. La ricerca finora è stata indirizzata a valutare la possibilità di attenuare il rumore tramite piante ma poco o niente è noto sui processi morfogenetici e fisiologici che possono venire innescati dall'impatto dell'energia acustica sui tessuti vegetali.

L'attenuazione del rumore tramite schermi rigidi offre una serie di notevoli vantaggi economici e tecnici, tuttavia si tratta di scelte da valutare singolarmente in quanto le pareti rigide, oltre a essere psicologicamente deprimenti, riflettendo e diffrattando le onde sonore possono creare fastidiosi effetti tunnel anche agli stessi automobilisti.

La biodiversità degli ecosistemi

La vita di ogni organismo è condizionata dall'azione continua esercitata dall'ambiente che lo circonda, cioè dalle interrelazioni che si instaurano con l'ambiente fisico in cui vive e con gli altri individui che lo accompagnano. Questo intreccio di relazioni è tanto forte da indurre a considerare gli organismi e l'ambiente fisico, in cui essi si trovano immersi, come parte di un sistema ecologico integrato, o ecosistema.

In generale un sistema può essere definito un insieme di componenti interdipendenti, che regolarmente interagiscono tra loro e che formano un tutt'uno. Le componenti mantengono la loro individualità, non si fondono quindi a costituire un «superorganismo» ed il sistema è caratterizzato da proprietà cosiddette emergenti, che non sono cioè presenti nelle sue parti. Come non ritroviamo in idrogeno ed ossigeno le proprietà che essi assumono quando si uniscono a formare una molecola di acqua, così l'interazione anche di due soli organismi fa nascere potenzialità inaspettate, come la capacità di colonizzazione di un fungo e di un'alga uniti a formare un lichene, o l'elevatissima produttività di un corallo nato dall'associazione di un'alga e di un celenterato.

In questo modo la vita ed il funzionamento dell'ecosistema sono determinati non solo dalla somma delle proprietà delle parti che lo compongono, ma anche dalle proprietà collettive che derivano dall'organizzazione della biocenosi, con la sua diversità biologica, in una fitta rete di relazioni.

La «diversità biologica» o «biodiversità» rappresenta la molteplicità e la variabilità degli organismi viventi, dei sistemi ecologici in cui essi si orga-

* Istituto di Selvicoltura, Firenze.

nizzano e dell'informazione genetica che recano in sé; la diversità di un sistema è cioè determinata non solo dal numero, ma anche dalla frequenza relativa delle componenti in esso presenti.

Ad esempio la diversità di specie dell'ecosistema (Fig. 1) è determinata non solo dal numero di specie in esso presenti (densità di specie), ma anche dalla loro abbondanza relativa (omogeneità); in questo modo attribuiamo ad un bosco misto di faggio e abete, in cui cioè le due specie si bilancino, una diversità maggiore che ad una faggeta con pochi esemplari sparsi di conifera.

A seconda della scala considerata, si possono inoltre distinguere diversi livelli di diversità: non solo diversità di specie all'interno del singolo ecosistema, ma anche a livello di paesaggio e di intera regione biogeografica.

Pur limitando la prospettiva al singolo ecosistema, questo non può comunque essere rappresentato efficacemente considerando solo quanti individui delle singole specie vi si trovino: dalla distribuzione nello spazio e nel tempo e dalle diverse interazioni fra loro e con l'ambiente risulta infatti una struttura che è stata definita «modello di diversità» dell'ecosistema.

D'altra parte ogni specie è caratterizzata da una propria diversità genetica. Questa, a sua volta, è organizzata su più livelli: una diversità genetica individuale, data dalla eterozigosità per i vari loci genici nel patrimonio ereditario del singolo organismo, ed una diversità genetica entro e fra popolazioni, imputabile alla distribuzione di eterozigosità, loci polimorfici e relativi alleli in gruppi di individui via via più distanti. Le moltissime analisi sui terpeni e sui sistemi gene-enzima condotte negli ultimi decenni, ed i più recenti studi sul DNA, hanno indicato che le piante forestali, in particolare, sono caratterizzate generalmente da livelli di diversità genetica spiccatamente alti.

Una prima conclusione può essere tratta da questa veloce panoramica sull'«architettura» della diversità biologica: la biodiversità è una funzione complessa di numerose componenti, ognuna delle quali ha diversa origine e reagirà in maniera differente ad ogni variazione dell'ambiente. D'altra parte, i diversi livelli della biodiversità risultano strettamente correlati fra loro: la ricchezza genetica di alcune specie è condizionata, ad esempio, dalla presenza di un mosaico di microambienti, cioè di una elevata diversità a livello di ecosistema o di paesaggio.

Alcuni ecosistemi naturali presentano valori notevolmente bassi di biodiversità: così, ad esempio, la foresta boreale di conifere è molto più uniforme, cioè meno diversa, della foresta tropicale, almeno finché si prendono in considerazione le sole specie arboree. Sono gli ecosistemi antropici, comunque, che presentano i valori più bassi di diversità: si è spesso rischiato infatti,

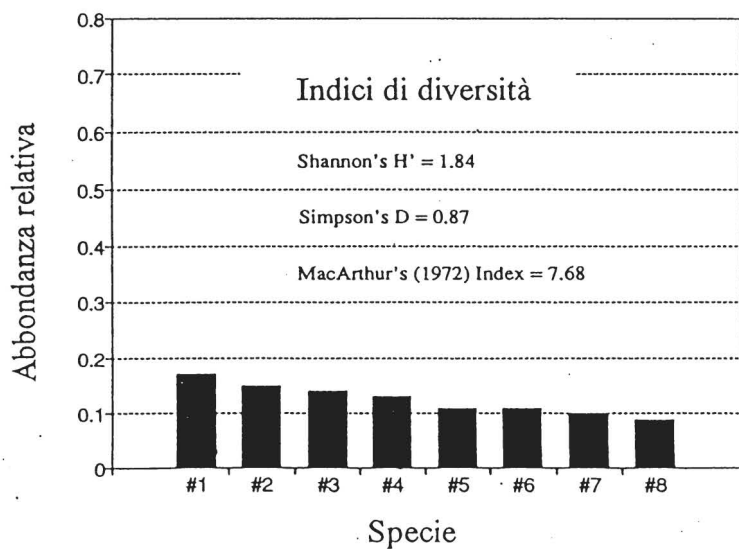
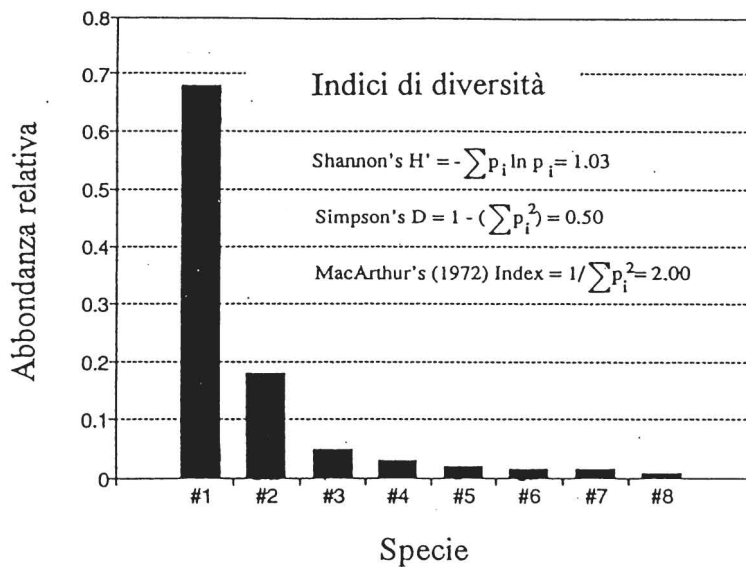


FIG. 1. — Confronto fra la diversità di due ipotetici ecosistemi caratterizzati dallo stesso numero di specie (identica ricchezza di specie), ma con differente abbondanza relativa.

soprattutto in passato, di eliminare qualsiasi traccia di variabilità genetica o ecologica da colture agrarie ed alberature urbane.

La domanda che nasce spontanea, in chi studi o semplicemente osservi questa organica complessità, è: quale ne è l'origine? La diversità degli ecosistemi naturali parrebbe in contrasto con il cosiddetto «principio dell'esclusione competitiva», per cui in un ambiente omogeneo una specie, la più adatta, dovrebbe lentamente prevalere su tutte le altre; questo è dovuto principalmente all'intrinseca eterogeneità dell'ambiente naturale (Fig. 2) che, ad una attenta analisi, si rivela un mosaico di microambienti, variabili nello spazio e nel tempo (Fig. 3), in cui specie con esigenze autoecologiche anche solo leggermente differenti possono coesistere. Le specie che realmente si trovano in competizione sono in effetti solo quelle che occupano esattamente lo stesso ambiente, ovvero la stessa «nicchia ecologica», sia essa la chioma di un albero o la tana di una talpa. Anche all'interno della stessa nicchia, poi, le singole specie insediano la loro progenie quando particolari condizioni ambientali le avvantaggiano rispetto alle popolazioni concorrenti.

Un ruolo essenziale nel mantenimento della diversità sarebbe svolto dal periodico ricorrere di fenomeni di disturbo, che oltre a modificare l'ambiente fisico dell'ecosistema, contribuendo così a creare quella eterogeneità cui si è accennato, sarebbero capaci di interrompere la pressione competitiva delle specie dominanti. In definitiva la diversità sarebbe massima dove nessuna specie può trovare condizioni tanto favorevoli da soverchiare nettamente le altre. Le perturbazioni, che permettono oltretutto l'insediarsi della rinnovazione nei varchi (gaps) lasciati dalla morte di individui adulti, sono quindi un fattore determinante nel mantenimento della struttura e della dinamica degli ecosistemi.

Il ruolo delle perturbazioni dipende comunque dalle caratteristiche dell'ecosistema e dalla natura del disturbo stesso: se infatti disturbi ambientali di limitata frequenza e intensità massimizzano la diversità del sistema, perturbazioni catastrofiche possono al contrario indurre una omogeneizzazione dell'ambiente, determinando quindi una riduzione della diversità specifica dell'ecosistema.

La selezione per un ambiente eterogeneo è alla base anche della diversità genetica degli ecosistemi. Nelle diverse condizioni microambientali ed in diversi momenti, infatti, la selezione ambientale avvantaggerà geni e combinazioni geniche differenti, favorendo così sia l'eterozigosità a livello individuale, sia la differenziazione di ecotipi. D'altra parte la migrazione di polline e semi verso e/o da habitat adiacenti, in cui pure agiscano differenti spinte selettive, può essere causa di una notevole variabilità. È proprio questa mol-

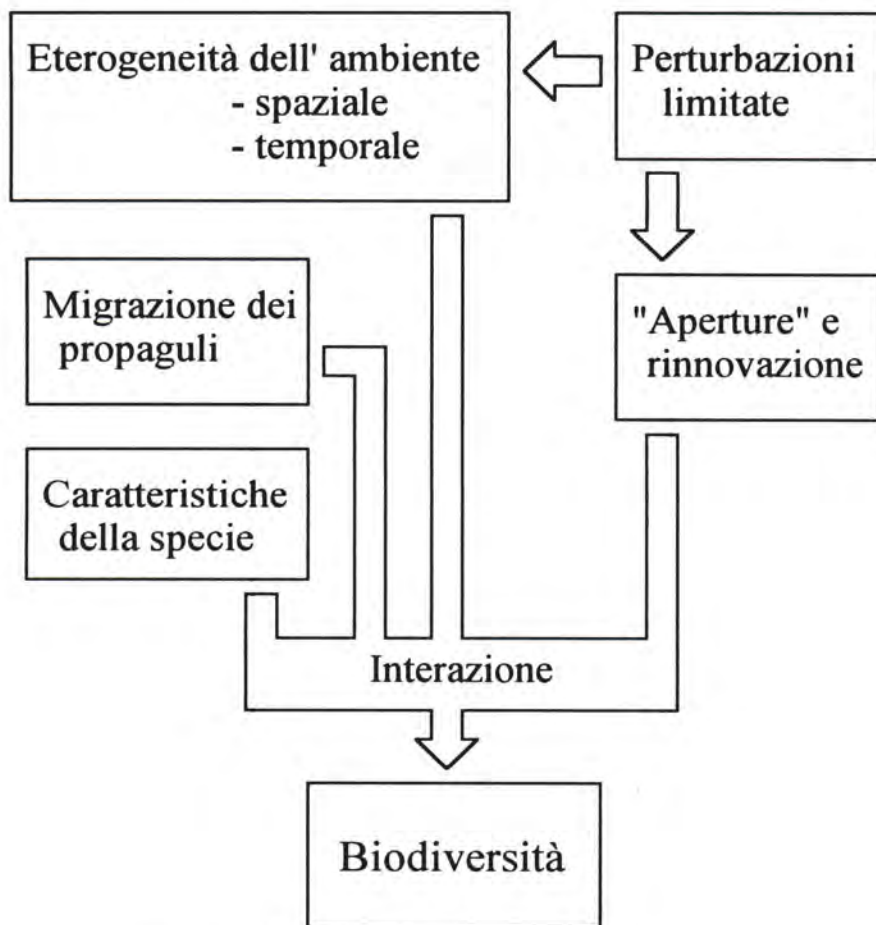


FIG. 2. — Condizioni per il mantenimento della biodiversità.

tepicità genetica, d'altro canto, sia come diversità a livello di popolazione, sia come eterozigosità a livello di individuo, a costituire la base dell'adattamento, ampliando lo spettro della risposta ecofisiologica e permettendo così di sfruttare con sufficiente successo una grande varietà di habitat. Proprio grazie a questa più ampia risposta ecologica la diversità genetica garantisce inoltre la specie contro fenomeni di disturbo e le permette di far fronte e di adattarsi a variazioni ambientali future.

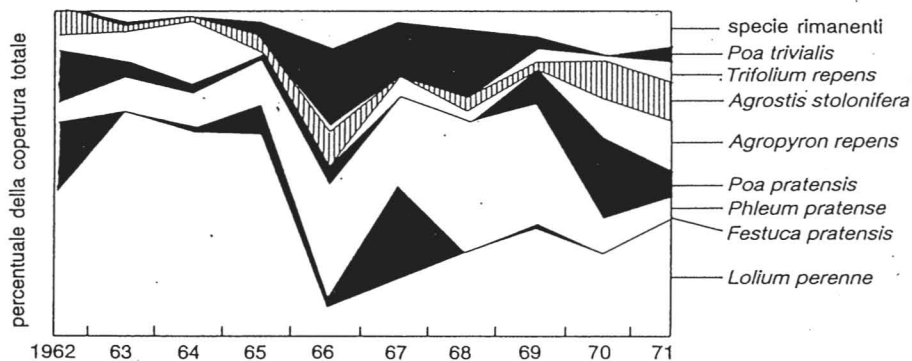


FIG. 3. — Effetti dell'eterogeneità temporale dell'ambiente sulla diversità di specie dell'ecosistema: variazioni dell'abbondanza relativa delle specie componenti un pascolo, in presenza di gradi variabili di inondazione (da Mueller e Forster, 1974, modificato).

Rimane aperta invece la questione del valore ecologico della diversità, in particolar modo della diversità di specie. È noto infatti che sistemi troppo semplificati sono particolarmente esposti alla variabilità del clima e ad epidemie, qualora non vengano sorretti dall'uomo con forti inputs energetici. D'altra parte l'elevata diversità spesso presente negli ecosistemi naturali presenterebbe secondo alcuni Autori ampi margini di ridondanza e succedaneità. Non sembra, infatti, che ad una elevata diversità specifica corrispondano i massimi livelli di produttività, né essa determina sempre una maggiore stabilità dell'ecosistema, intesa vuoi come resistenza al cambiamento, vuoi come capacità di recupero (resilienza) cessata la perturbazione. Al contrario ecosistemi a diversità molto elevata, quali la foresta tropicale o la barriera corallina, si dimostrerebbero spesso fra i meno resilienti.

La stabilità dell'ecosistema sarebbe subordinata alla presenza di una fitta rete di interazioni fra le sue parti, che porterebbe ad una elevata omeostasi del sistema. In alcuni casi ad un aumento della ricchezza specifica corrisponde un'accresciuta inerzia, a scapito comunque della resilienza dell'ecosistema, il quale viene sì alterato con maggior difficoltà, ma con maggior difficoltà ritorna poi alla condizione precedente il disturbo.

Questa relazione non sarebbe però dovuta ad un rapporto causale diretto, ma alla presenza, in condizioni ambientali difficili (bassi livelli di fertilità), di una diversità elevata risultante dalla presenza di specie caratterizzate da bassi livelli di competizione ed al tempo stesso da un'elevata inerzia ed una bassa resilienza.

Richiedendo spesso una parziale ricolonizzazione a partire da nuclei su-

perstiti, la resilienza dell'ecosistema sembra condizionata al permanere di rifugi che fungano da nuclei di diffusione; essa richiederebbe cioè la presenza ed il mantenimento all'interno del paesaggio di una varietà di biocenosi differenti, vale a dire di una diversità di paesaggio.

La resilienza sarebbe inoltre maggiore in comunità adattate a periodiche perturbazioni ambientali, in quanto questa condizione permetterebbe loro di far meglio fronte a disturbi anche nuovi, purché simili a quelli per lungo tempo sperimentati. Alcune comunità sono ad esempio adattate al periodico ricorrere dell'incendio o di tempeste di vento e sopportano perciò senza gravi conseguenze di essere utilizzate dall'uomo con modalità che mimino questi eventi catastrofici naturali.

Appare sempre più evidente come la diversità degli ecosistemi, per le sue molteplici funzioni, presenti e future, meriti di essere conservata e se possibile accresciuta.

Capiamo oggi che solo mantenendo ecosistemi agrari e forestali sufficientemente ricchi di specie e di genotipi possiamo pensare di mantenere nel tempo soddisfacenti livelli di produzione. Più in generale dobbiamo ricordare che gli ecosistemi naturali, con la loro diversità, costituiscono un serbatoio di prodotti naturali dalle possibili future applicazioni farmaceutiche o agricole. Queste importanti potenzialità sono state portate alla pubblica attenzione dal dibattito sull'attribuzione dei diritti di sfruttamento nel corso dell'Earth Summit a Rio. Basi pensare che il *Catharanthus roseus*, una specie nativa del Madagascar, è fonte di più di 60 alcaloidi, usati nella cura della leucemia infantile e del morbo di Hodgkin, per un valore di 160 milioni di dollari ogni anno. Piante dalle proprietà ancora sconosciute si possono oggi trovare non solo nell'intrico delle foreste tropicali: una specie componente del sottobosco delle foreste nordamericane, ad esempio, il *Taxus brevifolia*, è la fonte del taxolo, un composto attivo contro il cancro. Il problema sta forse nel fatto che semplicemente non possiamo prevedere l'uso ed il significato per l'uomo di una qualsiasi componente dei nostri ecosistemi.

Ma il valore degli ecosistemi naturali sta oggi, forse ancor più che nella pur importante funzione produttiva presente o futura, nella protezione dell'assetto idrogeologico del territorio e nei servizi igienico-ricreativi che essi gratuitamente forniscono alla collettività. Lo svolgimento di queste funzioni è subordinato al mantenimento di una elevata diversità specifica e strutturale. La diversità delle biocenosi è per questo motivo il principale criterio adottato nella definizione del valore di un ecosistema e quindi dell'opportunità di salvaguardarlo.

L'importanza di alcune singole specie risiede inoltre nella loro funzione

di indicatori ecologici, essendo esse così intimamente associate a determinate condizioni ambientali da poter essere utilizzate come preziosi campanelli d'allarme della qualità dell'ambiente. Non solo si utilizzano infatti i licheni come indicatori di inquinamento atmosferico, ma come negli anni '60 il pericolo insito nell'uso del DDT fu reso manifesto dalla mancata riproduzione degli uccelli predatori, così oggi il declino in tutto il mondo delle popolazioni di anfibi sembra suggerire che l'inquinamento abbia raggiunto un livello di guardia su scala globale.

L'accento posto sulla conservazione di singole specie deriva spesso proprio da questo loro ruolo di indicatori delle condizioni dell'ambiente in cui vivono e quindi delle possibilità di sopravvivenza di tutto l'ecosistema di cui fanno parte: è il caso della civetta maculata (*Strix occidentalis*), la cui protezione divide l'opinione pubblica nordamericana proprio perché richiederebbe la creazione di una vasta rete di riserve ambientali di foresta «old growth».

L'azione dell'uomo ha da lungo tempo modificato gli ecosistemi naturali, giungendo a livelli di serio degrado. È sempre più evidente che molte delle alterazioni dell'ambiente di origine antropica hanno assunto dimensioni tali da non poter più essere considerate ed affrontate solo a livello locale, tanto da indurre a parlare appunto di «Global Change». L'azione degli inquinanti atmosferici travalica le frontiere nazionali, l'incremento dei cosiddetti «gas di serra» interessa l'atmosfera terrestre nel suo complesso, la deplezione dello strato protettivo di ozono e la distruzione delle foreste mondiali al tempo stesso derivano da responsabilità comuni ed hanno conseguenze su scala mondiale.

L'entità ed i meccanismi di azione delle diverse forme di inquinamento sono già stati efficacemente illustrati in questa sede dal Prof. Lorenzini e dal Prof. Grossoni; voglio ora sottolineare, invece, le importanti conseguenze dell'aumento della concentrazione atmosferica dei cosiddetti «gas di serra». Le previsioni indicano infatti che il «Climate Change» che ne deriverà sarà non solo significativo, ma anche rapido, forse 15-40 volte più veloce dei cambiamenti climatici passati. Questa perturbazione agirà sulla diversità degli ecosistemi in maniera probabilmente differente dagli altri tipi di disturbo, che come si è detto contribuiscono al suo mantenimento: il cambiamento climatico previsto avrà infatti un'azione non episodica e limitata, ma continua e costante in direzione, determinando una pressione selettiva sugli organismi altrettanto costante.

Ognuna di queste alterazioni di origine antropica sta inducendo o indurrà in un prossimo futuro una sensibile alterazione della biodiversità degli ecosistemi, in tutte le sue forme.

Occorre per prima cosa sottolineare che la condizione di fondo per un

adattamento delle popolazioni alle mutate condizioni è la presenza di una base di individui dotati di una certa resistenza, da cui per fenomeni di selezione e successivo inincrocio si origina una comunità più adatta al nuovo ambiente; la dinamicità di questo adattamento evolutivo ci ricorda l'importanza del fattore tempo (Fig. 4), cioè sia della velocità del cambiamento ambientale, sia dell'intervallo di tempo fra generazioni nelle diverse specie, che varia dai mesi, negli insetti ad esempio, all'anno, in piante erbacee, ai decenni in molti alberi.

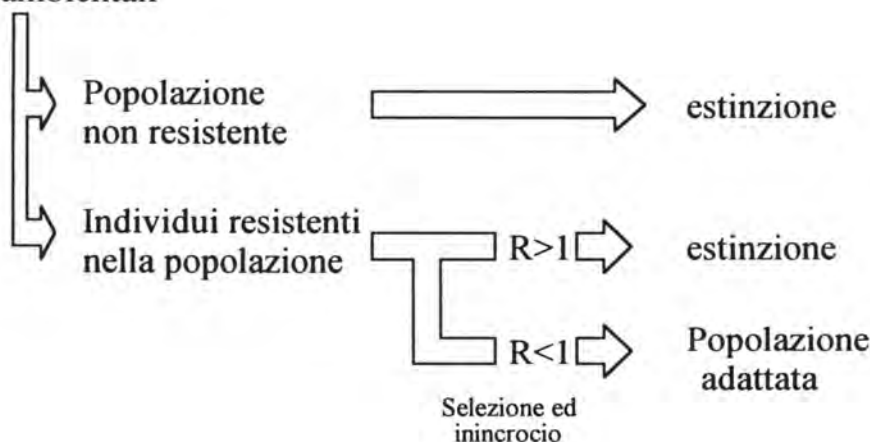
Dove questa base genetica di resistenza non sia presente, si assisterà ad una modificazione degli areali specifici, cioè alla scomparsa della specie da alcuni ecosistemi; l'effetto di questa semplificazione sull'ecosistema dipenderà dalla produttività della specie colpita, quindi da «quanto spazio» occupava nella comunità, e dal suo ruolo nel controllo delle funzioni del sistema.

Molti degli scenari dei futuri effetti del «Global Warming» prevedono uno spostamento degli areali delle specie (Fig. 5) in accordo con i mutamenti climatici; ma la migrazione dei diversi componenti degli ecosistemi non sarà probabilmente né sincrona né coincidente; le attuali biocenosi verranno quindi ricombinate, modificando così i rapporti interspecifici (competizione, predazione, mutualismo) che degli ecosistemi determinano struttura e stabilità. Anche l'inquinamento ha condotto in molti casi a variazioni nella composizione specifica e nella dominanza delle specie all'interno degli ecosistemi, ed in forma acuta ha portato ad una riduzione complessiva della densità di specie; oltre a questa diminuzione della ricchezza specifica, lungo un gradiente di inquinamento acuto si è osservata anche una riduzione di omogeneità e di diversità complessiva dell'ecosistema.

Molti degli studi in materia si sono concentrati sugli effetti dei disturbi sulla vitalità delle piante, ma non va dimenticata l'importanza delle alterazioni indotte dall'inquinamento e dal «Global Warming» sulla biologia della riproduzione, cioè sulla fertilità dei singoli genotipi e quindi sulla loro fitness complessiva: precipitazioni di acidità ben minore di quella che danneggia gli apparati fogliari sembrano ad esempio alterare la germinabilità del polline, costituendo così un fattore di selezione pur in assenza di qualsiasi danno evidente.

L'effetto di questo tipo di inquinamento cronico, cioè lieve ed intermittente, ma prolungato nel tempo, dipende probabilmente in larga misura dalle caratteristiche delle singole specie. In molti casi, comunque, anch'esso indurrà un adattamento e quindi, come contropartita, una diminuzione della diversità genetica della popolazione («genetic erosion»). Difatti una variazione della fitness di geni e genotipi per una pressione ambientale costante e omogenea porta, attraverso un processo di selezione orientata, oltre alla

Alterazioni
ambientali



$$R = \frac{\text{velocità di alterazione}}{\text{velocità di adattamento}}$$

FIG. 4. — Meccanismo di azione delle alterazioni ambientali ed importanza del fattore temporale: se la velocità di alterazione supera la velocità di adattamento ($R < 1$) si può giungere all'estinzione pur in presenza di una base di resistenza.

variazione delle frequenze geniche e genotipiche, alla perdita degli alleli scarsamente adatti.

La migrazione di materiale genico, che potrebbe prevenire l'estinzione della specie o la perdita di particolari alleli, sarà subordinata alla permanenza di stazioni rifugio e di idonei corridoi di scambio genetico, mentre sempre più le popolazioni di molte specie vengono trasformate in metapopolazioni (popolazioni di sottopopolazioni più o meno isolate) dalla frammentazione degli habitat operata dall'uomo.

Dobbiamo infine sottolineare come le componenti meno appariscenti delle comunità, le meno considerate in molti dei nostri studi, rivestano spesso un ruolo fondamentale nel funzionamento dell'ecosistema: chi conosce il numero delle specie di microrganismi presenti nel suolo dei nostri boschi o delle nostre città? Eppure sappiamo che parte dei danni sofferti dalle piante sono probabilmente dovuti agli effetti dell'inquinamento su micorrize e azo-

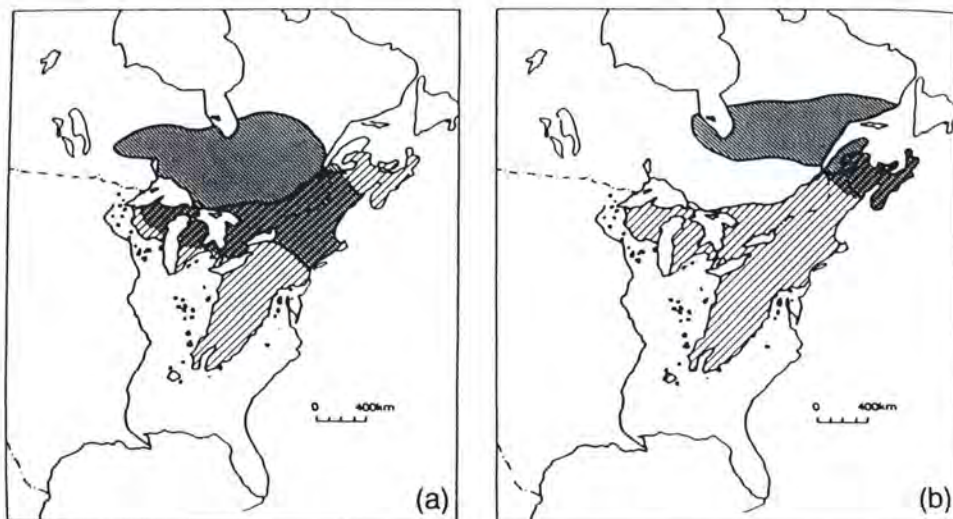


FIG. 5. — Effetti previsti del «Global Warming» sulla distribuzione delle specie: areale nordamericano presente e futuro di *Tsuga canadensis* in risposta a due differenti scenari climatici. Areale presente tratteggiato, areale potenziale ombreggiato (da Davis e Zabinski, 1991).

tofissatori, che di alcune specie costituiscono i compagni indispensabili. Deve essere questo un richiamo ad apprezzare il ruolo della diversità nel funzionamento del nostro ambiente.

La conoscenza del ruolo della diversità e delle condizioni per il suo mantenimento deve esserci guida nella definizione di una politica di gestione degli ecosistemi e di ripristino ambientale.

Sappiamo che livelli minimi di diversità sono indispensabili per il mantenimento di ecosistemi vitali; sappiamo però anche come la diversità si articoli su più livelli e come una sua componente possa diminuire, fino anche ad estinguersi, pur aumentando la diversità complessiva e lo stato di salute dell'ecosistema.

Qualsiasi scelta di gestione influenzerà diversamente le diverse componenti della biodiversità ed è anzi condannata a ridurre alcune di esse; sta a noi operare scelte che massimizzino però le caratteristiche più importanti per un determinato ecosistema e per i servizi che da esso ci attendiamo. La conservazione di una elevata diversità complessiva dell'ecosistema coincide infatti con la massimizzazione a medio termine della sua utilità per l'uomo, in termini sia di valore estetico, sia di stabile produzione, sia di resistenza

a patogeni ed avversità climatiche, in particolare nella prospettiva di un profondo cambiamento globale del clima.

Sappiamo d'altra parte che il congelamento degli ecosistemi attuali in una conservazione assoluta ed intransigente non è né possibile né compatibile con la dinamica delle popolazioni e delle comunità, intrinsecamente instabili e mutevoli.

Non siamo oggi in grado di predire quali saranno gli effetti del «Global Change» sulla diversità degli ecosistemi, e questo compito impone un crescente sforzo di ricerca. Occorre anzitutto una migliore conoscenza della diversità presente nei nostri ecosistemi e del ruolo che le diverse forme di diversità ecologica e la molteplicità genetica ricoprono nel loro funzionamento. Questo impone fra l'altro di superare in un lavoro comune le barriere esistenti fra le diverse discipline (genetica, ecofisiologia, ecologia), proprio per il carattere unitario della biodiversità e dell'ecosistema.

Un modello per valutare gli effetti del «verde» sulle condizioni ambientali

Dalle relazioni emergono due fatti sostanziali: da una parte il rischio gravissimo che il pianeta sta correndo per l'azione dell'uomo, dall'altra un evidente squilibrio fra le azioni conoscitive che si vanno ormai diffondendo, per la sensibilità del mondo della ricerca a questi problemi, e la sostanziale carenza di interventi concreti. È evidente che ogni intervento richiede idee assai chiare sull'insieme dei fenomeni da affrontare ma è anche vero che non è necessario attendere che tutto sia chiarito, perché potrebbe essere troppo tardi.

È in questo senso che un'Istituzione come l'Accademia dei Georgofili, che per tradizione nel passato ha affrontato problemi di attualità, può dare un contributo concreto ponendosi come interlocutore ed ausilio delle istituzioni di governo che hanno il dovere di contribuire a dare risposte concrete a questi problemi.

Per fare ciò è senz'altro necessario approfondire gli studi e le ricerche ma anche ipotizzare modelli di intervento che permettano di affrontare già il problema, seppure in modo parziale e perfettibile.

La scala dei fenomeni e degli interventi

Come in climatologia, per la maggior parte dei problemi ambientali la definizione di scala a cui lavorare costituisce la prima scelta da effettuare. Come è stato messo in evidenza parlando della biodiversità e delle caratteri-

* I.A.T.A.-C.N.R. - Dipartimento di Agronomia e Produzioni Erbacee, Firenze.

stiche degli ecosistemi in confronto a quelle delle singole specie o addirittura dei singoli individui, il cambiamento di scala non implica una relazione di tipo lineare ma un legame senz'altro più complesso ed articolato.

Nell'approccio al ruolo della vegetazione nell'ambito del «Global Change» possono essere identificati i due estremi: da una parte il ruolo della vegetazione a scala planetaria nel controllare il ciclo dell'acqua, i cicli geobiochimici, l'albedo della superficie terrestre, il ciclo del carbonio e quindi come una componente fondamentale dei meccanismi di regolazione e di equilibrio, dall'altra a scala locale nello svolgere il ruolo di filtro per le impurità, di regolatore del microclima, di asilo per uccelli ed insetti, di barriera per i rumori, di protagonista del paesaggio, di controllore degli stati emotivi e percettivi dell'uomo.

Gli interventi relativi alla scala «macro» richiedono un impegno integrato di tutti i paesi del mondo ed in particolare di quelli industrializzati, che posseggono i mezzi e le conoscenze per affrontare tali problemi. Per quanto ci riguarda, esso richiede la continua concertazione con il Ministero dell'Ambiente che senza dubbio potrà essere concordata a partire da questa iniziativa. Per quanto riguarda invece gli interventi a scala topografica e di dettaglio, questi possono essere indicati in modo assai più semplice e potrebbero rappresentare veramente il risultato più evidente di questa iniziativa.

Un sistema di valutazione

Un sistema di valutazione prende avvio dalla parametrizzazione della situazione esistente. Il parametro principale da considerare sarà ovviamente diverso nel caso di aree urbane o di aree rurali. Nel primo caso tale parametro può essere rappresentato da:

- la superficie occupata dal verde;
- la distribuzione del verde, ad es. un filare od un boschetto;
- il tipo di vegetazione e la sua dinamica temporale;
- la sua natura per così dire giuridica: pubblico o privato;
- la distribuzione rispetto alle strutture edilizie od alle infrastrutture, strade, edifici pubblici;
- il grado di manutenzione e di rispetto.

Nel caso delle aree rurali i parametri da prendere in considerazione potrebbero essere:

- la superficie coltivata;
- la superficie incolta;

- la superficie a bosco;
- l'inventario delle colture;
- l'inventario del bosco;
- lo stato del bosco;
- il tipo di paesaggio, ad esempio terrazzato, vigneto specializzato, oliveto promiscuo e vigneto, ecc.;
- il rapporto tra verde, morfologia ed infrastrutture (strade alberate, cipressi di confine, antichi roccoli, piante isolate, ecc.);
- le superfici nude come cave, strade ed autostrade, ripe fluviali, insediamenti industriali in aree rurali, ecc.;
- gli edifici rurali e non;
- i centri abitati;
- i laghi e i fiumi.

I mezzi per effettuare un inventario secondo i criteri sopra descritti vanno dal rilevamento diretto, al campionamento statistico, al censimento, alla fotografia aerea, all'uso del telerilevamento da satellite con tecniche adeguate come l'analisi multitemporale che permette di distinguere ad esempio le aree coltivate da quelle abbandonate.

La combinazione di questi mezzi può permettere di ridurre i costi, che rappresentano l'elemento vincolante per una diffusa mappatura del territorio nazionale, e di accelerare i tempi di realizzazione che costituiscono un altro limite importante.

L'uso dei sistemi di informazione geografica (GIS) permette di passare da un semplice inventario, seppure organizzato per categorie, ad una fase propositiva da collegare con una fase normativa che rappresenta, insieme con quella fiscale, l'unico modo per cambiare drasticamente il paesaggio che ci circonda, nel senso di una maggiore attenzione al ruolo del verde ed alla sua progettazione pubblica e privata.

È infatti quantomeno curioso, per non usare altri termini per carità di patria, che nella patria dei «giardini all'italiana» che arricchivano le ville sparse in tutta Italia — dalle ville del Veneto e del Friuli a quelle della Toscana e del Lazio fino alla reggia di Caserta (molti sono attualmente in stato di grave degrado, sintomo della sensibilità dei nostri tempi!) — e nonostante associazioni come Italia Nostra, WWF o addirittura partiti politici come i Verdi, non siano operanti meccanismi che permettano di ricostruire il Paese da questo punto di vista, dopo il degrado degli ultimi quarant'anni causato insieme da amministratori miopi ed ignoranti, da una scuola arretrata e pasticcione a tutti i livelli, da una rapida trasformazione della società italiana

secondo principi e criteri non ispirati ad una opportuna crescita culturale e dalla mancanza di opposizioni moderne ed illuminate.

I criteri per effettuare una programmazione del verde differiscono ovviamente tra le aree urbane e quelle rurali così come differiranno i meccanismi da mettere in atto per raggiungere lo scopo che ci prefiggiamo.

Per quanto riguarda le aree urbane, i parametri da prendere in considerazione riguardano:

- la stima delle emissioni gassose e la deposizione asciutta per m^2 ;
- la produzione di ossigeno da parte delle piante;
- le aree dove è possibile intervenire;
- l'entità dell'isola di calore e le possibili modifiche del microclima mediante una simulazione del bilancio energetico;
- le modifiche microclimatiche per le singole tipologie abitative;
- le previsioni di sviluppo nelle aree non ancora urbanizzate;
- l'illuminazione degli edifici da parte del sole;
- gli elementi del macroclima, del mesoclima, del topoclima e del microclima;
- le strutture addette al verde urbano.

Per le aree rurali si devono valutare:

- gli aspetti paesaggistici;
- la difesa dall'erosione del suolo;
- l'emissione di ossigeno e l'assimilazione di anidride carbonica;
- il bilancio idrico e l'effetto sulle falde;
- la produzione primaria;
- gli aspetti connessi con il turismo ed il tempo libero.

Lo schema sinteticamente proposto rappresenta un'indicazione per un approccio globale a livello di territorio per un equilibrato sviluppo delle attività umane e degli equilibri ambientali.

Naturalmente tali indicazioni, che necessitano un opportuno dettaglio tecnico, che non è il caso di affrontare in questa sede, richiedono invece una serie di strumenti normativi e di incentivi di varia natura perché possano effettivamente essere realizzate. Come già dicevo, infatti, per modificare la situazione attuale di grave degrado è necessario creare una cultura ed una coscienza e per fare ciò il mezzo più rapido è quello normativo e quello fiscale, sia in termini di imposizioni, che siano però direttamente rivolte alla soluzione del problema in oggetto, sia in termini di sgravi fiscali che sollecitino l'interesse del privato. Un aspetto importante è quello relativo non soltanto agli impianti nelle aree di nuova urbanizzazione e ai nuovi edifici ma anche quello relativo alla manutenzione. È assai comune, infatti, assistere nel nostro paese alla realizzazione di importanti complessi che nel volgere

di pochi anni sono completamente degradati per mancanza delle opportune opere di manutenzione. Anche in questo caso non si può lasciare alla buona volontà del privato o del pubblico di decidere se effettuare o no le opportune azioni di manutenzione; è necessario creare una cultura attraverso delle norme che le rendano obbligatorie come viene fatto in molti paesi europei e negli USA.

L'argomento delle normative esula per il momento da questa proposta di un modello di valutazione del «verde», ma rappresenta uno dei punti centrali dei suggerimenti che concluderanno questo incontro.

Conclusioni

Non ho ricevuto nessuna ulteriore iscrizione a parlare. Devo chiedere ai relatori se hanno qualche cosa da aggiungere, anche alla luce degli interventi.

Poiché nessuno chiede la parola, comunico che da parte dei relatori è stato preparato un sintetico documento conclusivo che viene proposto a tutti voi, anche per corrispondere a quanto questa mattina il Ministro Spini ci ha sollecitato. Come era stato già precisato negli inviti che sono stati diramati, tra gli scopi che questa iniziativa intende perseguire, vi è proprio l'indicazione delle azioni più opportune da promuovere per il conseguimento dei necessari obiettivi. Ogni Giornata di studio — anche le prossime — dovrebbe concludersi con la formulazione di proposte concrete. Stiamo lavorando sotto l'esigenza — come è stato ripetutamente sottolineato oggi — non soltanto di illustrare le conoscenze scientifiche sempre più aggiornate, ma di tradurre queste in programmi operativi; con molto pragmatismo: è il tempo di operare.

Vorrei aprire la discussione sul testo di questo documento che vi è stato distribuito, sollecitando la vostra collaborazione per migliorarne la stesura, per integrarla e perché possa essere quanto più efficace possibile.

[Il testo della mozione viene approvato all'unanimità. Il Presidente riprende quindi la parola].

Desidero ringraziare nuovamente i Lincei e prego il Prof. Scarascia, illustre Linceo, di rendersene interprete. Ringrazio il Presidente Salvini — ed il Prof. Capanna che lo ha rappresentato qui stamattina — per la sensibilità

che ha dimostrato e per la cortesia con la quale ci hanno accolti tutti coloro che lavorano presso questa gloriosa Accademia. Vorrei ringraziare il Ministro Spini per essere stato presente, nonostante i gravosi impegni che incombono particolarmente in questo momento sul Governo e per il suo intervento così lungimirante e concreto da lasciare sperare in qualcosa di cambiato non soltanto nel clima, ma anche negli altri elementi che determinano la realtà nella quale viviamo.

Consentitemi di esprimere un caldo e sentito ringraziamento ai relatori che, disinteressatamente, hanno offerto la propria collaborazione ed hanno lavorato rispettando i tempi. Ringrazio gli interventi di tutti coloro che hanno offerto un contributo nella discussione e ringrazio tutti i partecipanti. Devo dire che non soltanto nell'Accademia dei Lincei, ma anche altrove, è raro trovare un uditorio, fatto anche di molti giovani, che all'una, quando ho chiuso temporaneamente i lavori, erano ancora tutti a sedere in silenzio. Questo è un fatto incentivante per affrontare il lavoro che ci attende.

Grazie quindi a tutti coloro che, così numerosi e qualificati, hanno partecipato alla nostra iniziativa ed arrivarci a presto, alla prossima Giornata, nella data e nel luogo che saranno comunicati.

Franco Scaramuzzi

Mozione conclusiva

Il ruolo della vegetazione — cioè del «verde», per esprimersi con un sintetico neologismo — è centrale nel quadro del «cambiamento globale» (*Global Change*) che è in atto sul nostro pianeta e che prospetta difficoltà drammaticamente crescenti per molte delle attuali forme di vita, compresa quella dello stesso uomo.

Le allarmanti modifiche dell'atmosfera, con i relativi riflessi climatici, le negative variazioni quanti-qualitative dell'acqua, la riduzione delle superfici utilizzabili per le coltivazioni ed il degrado dei terreni sono gli elementi fisici generalmente più considerati nelle analisi delle influenze antropiche sul «cambiamento globale».

Le piante sono essenziali, non solo come produttrici di sostanza organica indispensabile per la stessa vita animale, ma ci aiutano con la loro azione di filtraggio dell'atmosfera, di regimazione delle acque, di regolazione del ciclo degli elementi nutritivi, di integrazione con altre forme di vita (microrganismi, insetti, ecc.), di influenza sul clima, di monitoraggio dei parametri ambientali; e persino aiutano, non poco, la nostra psiche.

L'attenzione verso questi problemi — già insita nella stessa definizione di *georgofilo* — va al di là di un puro interesse scientifico, ma oggi assume carattere di urgenza.

Va sottolineata quindi l'opportunità di tempestivi interventi atti a favorire una maggiore tutela della vegetazione. In particolare si auspica:
— un monitoraggio dei parametri ambientali che hanno una maggiore in-

fluenza sull'ecosistema vegetale, e dei processi di degrado della vegetazione od a questo legati;

- un maggiore e prioritario sostegno alla ricerca scientifica interdisciplinare, finalizzata allo studio di problemi legati alla sopravvivenza delle piante ed al ruolo di queste nella difesa dell'ambiente;
- un concreto impegno nella divulgazione delle informazioni sul ruolo della vegetazione, attraverso ogni mezzo capace di agire sull'educazione civica, oltre che su quella scolastica di ogni ordine e grado.

La dimensione planetaria del «cambiamento» in atto esige una più diffusa consapevolezza e partecipazione: occorrono iniziative altrettanto globali, articolate a vari livelli e coordinate per aree geografiche e amministrative. L'attuale crescente impegno nazionale anche a livelli regionali e locali, è ripartito tra diverse competenze, spesso tra loro slegate o sovrapposte. Anche a livello di governo nazionale, sia per il coordinamento interno che per le funzioni di interfaccia con le sempre più numerose iniziative esterne, si rende ormai indispensabile organizzare un unico punto di riferimento tecnico-scientifico al quale facciano capo attività quali le banche dati specializzate, le reti di monitoraggio, i collegamenti con i settori produttivi e terziari interessati. Potrebbe configurarsi l'opportunità di creare, come in altri Paesi, un Osservatorio o un'Agenzia nazionale che avesse come compiti quelli di effettuare una fotografia dello stato dell'ambiente nei diversi comparti (dalle aree agricole a quelle urbane, dal mare agli ecosistemi forestali, dallo stato dell'atmosfera a quello idrogeologico). Tale Osservatorio potrebbe organizzare l'indispensabile sintesi delle informazioni che istituzionalmente i Servizi tecnici dello Stato raccolgono e tracciare un quadro organico della situazione e delle possibili iniziative da intraprendere.

Bibliografia

- AA.VV. (1990), *Biology and paleobiology of global change*, «Trends in Ecology & Evolution», 5: 269-322 (Special Issue).
- AA.VV., *La conservazione delle biodiversità in situ. Il caso Italia*, C.I.D.I.S. Rio Marina, 6-7 giugno 1992.
- ALPI A. (1987), *Fisiologia vegetale, ecofisiologia ed agricoltura*, in: *Argomenti di Scienze e Geografia*, Atti del Museo di Storia Naturale, Grosseto.
- BACCI L., BINDI M., MARACCHI G. (1990), *L'impatto delle variazioni climatiche sull'agricoltura*, «Economia Montana», 22(2): 38-43.
- BACCI L., CONESE C., MARACCHI G. (1988), *Modello per il calcolo della radiazione solare in un vigneto*, «Riv. Frutticoltura», Anno L, n. 7-8: 75-79.
- BACCI L., MARACCHI G., RASCHI A., ZIPOLI G. (1990), *Leaf spatial distribution and light interception in sorghum* (*Sorghum bicolor* (L.) Moench), Proc. of Inaugural Congress of ESA, Parigi, 5-7 dicembre, session 1, p. 68.
- BATISTONI P., VENTURA F., FIORENTINO E. (1990), *Prospettive offerte dalle protezioni vegetali antitumore*, «Autostrade», 22: 35-49.
- BECK G. (1982), *Pflanzen als Mittel zur Lärmbekämpfung*, Patzer Verlag GmbH, Berlin.
- BEGON M., HARPER J.L., TOWNSEND C.R. (1986), *Ecology*, Oxford, Blackwell.
- BENINCASA F., MARACCHI G., ROSSI P. (1991), *Agrometeorologia*, Patron.
- BERNATZKY A. (1978), *Tree ecology and preservation*, Elsevier Scientific Publishing Comp., Amsterdam.
- BOYER J.S. (1992), *Plant productivity and environment*, «Science», vol. 218, 443-448.
- BROWN L.R. (1991), *Nutrire il mondo. Lettura per la laurea in «honoris causa»*, Pisa, febbraio.
- BRUCE M.L., LASHOF D.A., *Greenhouse gas emission related to agricultural and land use practices, in Impact of carbon dioxide, trace gases and climate change on global agriculture*.
- BUSSOTTI F., BROGI L., GROSSONI P., COZZI A., GELLINI R. (1993), *Crown structure modifications in relation to air pollution*, Landscape and Urban Planning (in stampa).
- BUSSOTTI F., FERRETTI M., CENNI E., GELLINI R., CLAUSER F., GROSSONI P., BARBOLANI E. (1991), *Damages of new type to Mediterranean vegetation in Southern Sardinian forests (Italy)*, «Eur. J. For. Path.», 21: 290-300.
- BUSSOTTI F., GELLINI R., GROSSONI P., RADDI S. (1992), *Mediterranean forest tree decline in Italy*, Ed. by P. Raddi, National Research Council, Italy, Firenze.
- CECCARELLI N. (1990), *Crescita e sviluppo delle piante in serra*, in ALPI A., TOGNONI F. (eds.), *Coltivazione in serra*, Edizioni Agricole.

- CETUR (1983), *Acoustique et végétation. Effets de la végétation sur la propagation du bruit routier ou ferroviaire*, Le dossiers du CETUR.
- COLE D.W., RAPP M. (1981), *Elemental cycling in forest ecosystems*, in RESCHLE D.E. (ed.), *Dynamic principles of forest ecosystems*, 341-409, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- COOK D.I., VAN HAVERBEKE D.F. (1977), *Suburban noise control with plantings and solid barrier combinations*, Report of a study, University of Nebraska and U.S. Forest Service.
- ENEL (1990), *Effetto serra*, «Quaderni dell'energia» n. 18, 20 pp.
- FINK S. (1988), *Histological and cytological changes caused by air pollutants and other abiotic factor*, in SCHULTE-HOSTEDE S., DARRALL N.M., BLANK L.W., WELLBURN A.R. (eds.), *Air pollution and plant metabolism*, 36-54, Elsevier Sci. Publ., Amsterdam.
- FINK S. (1991), *Unusual patterns in the distribution of calcium oxalate in spruce needles and their possible relationships to the impact of pollutants*, «New Phytol.», 199: 41-51.
- GARREC J.P., KERFOURN C., LE MAOUT L., ROSE C. (1989), *Étude des surfaces foliaires des arbres dépérissants*, in BRASSER L.J., MULDER W.C. (eds.), *Man and his ecosystem*, 213-218, Elsevier Sci. Publ., Amsterdam.
- GIANNINI R. (1973), *Comportamento dei semenzali di abete bianco di diversa provenienza a vari gradi di ombreggiamento*, «Italia Forestale e Montana», XXVIII (1): 20-26.
- GRACE J. (1977), *Plant response to wind*, Academic Press, London.
- GREY G.W., DENEKE F.J. (1978), *Urban Forestry*, John Wiley and sons, New York.
- HALE M.G., ORCUTT D.M. (1987), *The physiology of plants under stress*, pp. 103-115, John Wiley & Sons, New York.
- HANISCH B., KILZ H. (1990), *Waldschäden erkennen. Fichte und Kiefer*, Ulmer-Verlag, Stuttgart.
- HARRIS R.H. (1983), *Effects of vegetative barriers on highway traffic-generated noise*, Thesis of Graduate Studies, Georgia Institute of Technology.
- HARTMANN G., NIENHAUS F., BUTIN H. (1988), *Farbatlas Waldschäden. Diagnose von Baum Krankheiten*, Ulmer-Verlag, Stuttgart.
- HASEMANN G., JUNG G., WILD A. (1990), *The loss of structural integrity in damaged spruce needles from locations exposed to air pollution. II. Epidermis and stomata (dermal tissue)*, «J. Phytopathology», 128: 33-45.
- HASEMANN G., WILD A. (1990), *The loss of structural integrity in damaged spruce needles from locations exposed to air pollution. I. Mesophyll and central cylinder*, «J. Phytopath.», 128: 15-32.
- HEAGLE A.S. (1989), *Ozone and crop yield*, «Annual Review Phytopath.», 27: 397-423.
- HEGGSTAD H.E., BENNET J.H. (1984), *Impact of atmospheric pollution on agriculture*, in TRESHOW M. (ed.), *Air pollution and plant life*, J. Wiley & Sons Ltd, Chichester.
- HEIL G.W., DIEMONT W.M. (1983), *Raised nutrient levels change heathland into grassland*, «Vegetatio», 53: 113-120.
- HUDDART L. (1990), *The use of vegetation for traffic noise screening. Research Report 238*, pp. 41, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne (Berkshire).
- JARVIS P.G., JAMES G.B., LANDSBERG J.J. (1976), *Coniferous forest*, in MONTEITH J.L. (ed.), *Vegetation and the Atmosphere*, vol. 2, pp. 171-264, Academic Press, New York.
- JONES H.G. (1992), *Plants and microclimate: A Quantitative Approach to Plant Physiology*, Cambridge University Press, UK.
- KELLOMÄKI S., KUULUVAINEN T., KURTIO O. (1986), *Effect of crown shape, crown structure and stand density on the light absorption in a tree stand*, in FUJIMORI T., WHITEHEAD D. (eds.), *Crown and canopy structure in relation to productivity*, pp. 339-353, Forestry and Forest Products Research Institute, Ibaraki, Japan.
- KELLOMÄKI S., OKER-BLOM P., KUULUVAINEN T. (1984), *The effect of crown and canopy structure on light absorption and distribution in a tree stand*, in TIGERSTEDT P.M.A., PUTTO-

- NEN P., KOSKI V. (eds.), *Crop physiology of forest trees*, Proceedings of the International Conference on Managing Forest Trees a Cultivated Plants, University Press, Helsinki.
- KIMBALL A.B., ROSENBERG N.J., ALLEN L.H. (eds.) (1990), *ASA Special Publication n. 53*.
- KINERSON R.J., HIGGINBOTHAM K.O., CHAPMAN R.C. (1974), *Dynamics of foliage distribution within a forest canopy*, «J. Appl. Ecol.», 11: 347-353.
- KOCH W., MAIER-MÄRCHER U. (1992), *Die Bedeutung des Wasserhaushaltes für die Beurteilung von Waldschäden*, «All. Forst Zeit.», 8: 394-400.
- KOVACS M. (1985), *Pollution control and conservation*, Ellis Horwood Limited, England.
- KRAGH J. (1982), *Road traffic noise attenuation by belts of trees and bushes. Rapport n. 31*, Danish Acoustical Laboratory, Lyngby.
- KRUPA S.Y., KICKERT R.N. (1989), *The greenhouse effect: impact of ultraviolet-B, radiation, carbon dioxide, and ozone on vegetation*, «Environm. Pollut.», 61: 263-393.
- KUTTNER W. (1987), *Spatial and temporal structures of the urban climates. A survey*, in GREFEN K., LOBEL J. (eds.), *Environmental meteorology*, Klüber Academic Publisher.
- LANDSBERG J.J. (1986), *Physiological ecology of forest production*, pp. 32-69, Academic Press, London.
- LARSEN J.B. (1988), *Ecophysiological reactions of different provenances of European silver fir (Abies alba Mill.) to SO₂ exposure during winter*, «Eur. J. For. Path.», 18: 44-50.
- LEE R. (1978), *Forest microclimatology*, Columbia University Press, New York.
- LORENZINI G. (1983), *Le piante e l'inquinamento dell'aria*, Edagricole, Bologna, 365 pp.
- LORENZINI G. (1992), *Plants as biomonitors of air quality*, in BONOTTO S., NOBILI R., REVOLTELLA R.P. (eds.), *Biological indicators for environmental monitoring*, 47-63, Sero Symposium Rev. No 27.
- MAGURRAN A.E. (1988), *Ecological Diversity and its Measurement*, London, Croom Helm.
- MAIER-MÄRCHER U., KOCH W. (1986), *Delignification of subsidiary and guard cell walls by SO₂ and probable implication on the humidity response of Picea abies (L.)*, «Karst. Eur. J. For. Path.», 16: 342-351.
- MATHY P. (ed.) (1988), *Air pollution and ecosystems*, Reidel, Dordrecht, 975 pp.
- MUNIZ I.P. (1991), *Freshwater acidification: its effects on species and communities of freshwater microbes, plants and animals*, «Proc. Royal Society of Edinburgh», 97B: 227-254.
- OKER-BLOM P., KELLOMÄKI S. (1983), *Effect of grouping of foliage on the within-stand and within-crown light regime: comparison and grouping canopy models*, «Agric. Meteorol.», 28: 143-155.
- PERCY K.E., BAKER E.A. (1990), *Effects of simulated acid rain on epicuticular wax production, morphology, chemical composition and on cuticular membrane thickness in two clones of Sitka spruce [Picea sitchensis (Bong.) Carr.]*, «New Phytol.», 116: 79-87.
- PETERS R.L., LOVEJOY T.E. (eds.) (1992), *Global warming and Biological diversity*, New Haven, CT, Yale Univ. Press.
- PICKETT S.T.A., WHITE P.S. (eds.) (1985), *The ecology of natural disturbance and patch dynamics*, Academic Press, Orlando.
- RAUNER H.L. (1976), *Deciduous forest*, in MONTEITH J.L. (ed.), *Vegetation and the Atmosphere*, vol. 2, pp. 241-264, Academic Press, New York.
- RAVERA O. (ed.) (1991), *Terrestrial and aquatic ecosystems. Perturbation and Recovery*, Ellis Horwood Publisher, N.Y.
- REIF A. (1989), *The vegetation of Fichtelgebirge: origin, site, conditions, and present status*, in SCHULZE E.D., LANGE O.L., OREN R. (eds.), *Forest decline and air pollution. A study of spruce (Picea abies) on acid soils*, 8-22, Ecological Studies, vol. 77, Springer-Verlag, Berlin.
- ROGERS P. (1990), *Climate change and global warming*, «Environm. Science & Technology», 24: 428-430.
- ROLOFF A. (1988), *Branching structure in hardwoods related to forest decline*, in CAPE J.N.,

- MATHY P. (eds.), *Scientific basis of forest decline symptomatology*, 73-91, Commission of the European Communities, Bruxelles.
- ROLOFF A. (1989), *Entwicklung und Flexibilität der Baumkrone und ihre Bedeutung als Vitalitätsweiser*, «Schweiz. Z. Forstwesen.», 140: 943-963.
- ROSENBERG N.J. (1983), *Microclimate: the Biological Environment*, John Wiley & Sons, New York.
- ROUSSEL L. (1965), *Indications provisoires sur les exigences en lumière de 12 essences forestières résineuses*, «Bull. Soc. For. de Franche-Comté», 5.
- RUTER A.J. (1975), *The hydrological cycle in vegetation*, in MONTEITH J.L. (ed.), *Vegetation and the atmosphere*, Academic Press, London.
- SANASILVA (1986), *Kronenbilder*, Ist. Fed. Ricerca Forestale, Birmensdorf.
- SCHENONE G., LORENZINI G. (1992), *Effects of regional air pollution on crops in Italy*, «Agric. Ecosys. and Environ.», 38: 51-59.
- SCHOLZ F., GREGORIUS H.-R., RUDIN D. (eds.) (1989), *Genetic effects of air pollutants in forest tree populations*, Springer-Verlag, Berlin.
- SCHÜTT P., KOCH W., BLASCHKE H., LANG K.J., REIGER E., SCHUCK H.J., SUMMERER H. (1985), *So stirbt der Wald*, München, BLV Verlagsgesellschaft.
- SHANDS W.E., HOFFMAN J.S. (eds.) (1987), *The greenhouse effect, climate change and U.S. forests*, Conserv. Found., Washington D.C.
- SKIBA V., CRESSER M. (1988), *The ecological significance of increasing atmospheric carbon dioxide*, Endeavour, New series, Vol. 12, No 3.
- SOLTIS D.E., SOLTIS P.S. (eds.) (1989), *Isozymes and plant biology*, Chapman and Hall, London.
- TAYLOR G.E., PITELKA L.F., CLEGG M.T. (eds.) (1991), *Ecological genetics and air pollution*, Springer-Verlag, Berlin.
- THIEBAUT B. (1988), *Tree growth morphology and architecture, the case of beech: Fagus sylvatica L.*, in CAPE J.N., MATHY P. (eds.), *Scientific basis of forest decline symptomatology*, 49-72, Commission of the European Communities, Bruxelles.
- TRESHOW M. (1970), *Environment & Plant Response*, pp. 245-353, McGraw-Hill Book Company, New York.
- TRESHOW M. (ed.) (1984), *Air pollution and plant life*, Wiley, Chichester, 486 pp.
- TURUNEN M., HUTTUNEN S. (1990), *A review of the response of conifer needles to air pollution*, «J. Environ. Qual.», 19: 35-45.
- WARING R.H., SCHLESINGER W.H. (1985), *Forest ecosystems: Concepts and Management*, Academic Press, N.Y.
- WARRICK R.A., BARROW E.M., WIGLEY T.M.L. (1990), *The greenhouse effect and its implications for the European Community*, CEC Report, 30 pp.
- WELLBURN A. (1988), *Air pollution and acid rain: the biological impact*, Longman, Harlow, 274 pp.
- WHITEHEAD D. (1986), *Dry matter production and transpiration by Pinus radiata stands in relation to canopy architecture*, in FUJIMORI T., WHITEHEAD D. (eds.), *Crown and canopy structure in relation to productivity*, pp. 243-261, Forestry and Forest Products Research Institute, Ibaraki, Japan.
- WILMERS F. (1987), *Green in urban climate*, in GREFFEN K., LOBEL J. (eds.), *Environmental meteorology*, Klüber academic publisher.
- WITTIG R. (1989), *Impact of air pollution on ecosystems with particular respect to nature conservation*, «Proc. S.I.T.E.», 7: 343-353.
- ZECH W. (1988), *Bavarian Forest*, in KRAHL-URBAN B., BRANDT C.J., SCHIMANSKY C., PETERS K. (eds.), *Forest decline*, 64-65, KFA Jülich GmbH.

Finito di stampare in Firenze
nella Nuova Stamperia Parenti
nel mese di febbraio 1994

ISSN. 0367/4134

Direttore responsabile: Prof. SERGIO ORSI
Autorizzazione del Tribunale di Firenze n. 1056 del 30 aprile 1956

