

Il problema dell'anidride carbonica

Il consumo di combustibili fossili e la distruzione delle foreste hanno determinato un aumento di anidride carbonica nell'atmosfera, il quale potrebbe portare a profonde modificazioni climatiche

di George M. Woodwell

Dal 1850 a oggi, le attività umane hanno prodotto un aumento nel contenuto atmosferico di anidride carbonica da 290 parti per milione, o anche meno, a poco più di 330 parti per milione. Forse un quarto dell'aumento totale si è avuto nel corso dell'ultimo decennio. Permanendo le tendenze attuali, entro l'anno 2020 il contenuto atmosferico di anidride carbonica potrebbe arrivare a sfiorare il raddoppio rispetto ai valori presenti. Fino a epoca recente, tale incremento veniva concordemente attribuito alla combustione di combustibili fossili, ma attualmente è emersa la possibilità che a esso contribuisca in egual misura un'altra circostanza: la distruzione di foreste su scala planetaria.

Anche se l'anidride carbonica è un gas presente solo in tracce nell'atmosfera terrestre - la sua concentrazione è infatti circa dello 0,3 per cento in volume - esso esercita probabilmente un'influenza critica sul controllo del clima terrestre, poiché assorbe energia radiante alle lunghezze d'onda dell'infrarosso. Il calore che in questo modo viene intrappolato è potenzialmente in grado di alterare profondamente il clima terrestre. Inoltre, affatto indipendentemente dai possibili effetti che può esercitare sul clima, l'anidride carbonica ha un'importanza critica anche come fonte del carbonio che viene fissato per fotosintesi dalle piante verdi e costituisce la base dell'esistenza del mondo animale e vegetale.

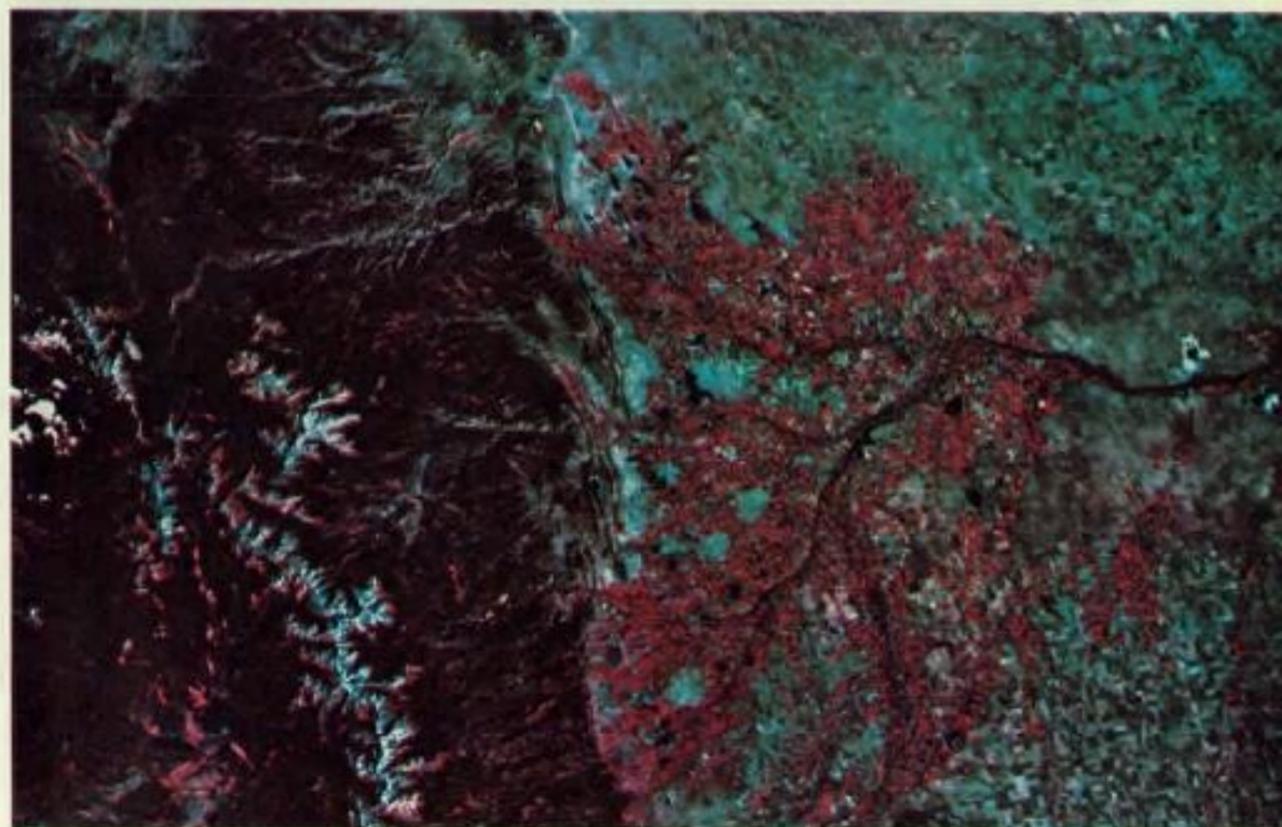
L'umanità si trova quindi di fronte a un dilemma storico. Le attività umane,

che stanno producendo un continuo aumento del contenuto atmosferico di anidride carbonica, lasciano presupporre un generale riscaldamento del clima nel corso dei decenni a venire. Anche se non si conoscono con certezza né l'entità dei cambiamenti climatici che interverranno né il preciso meccanismo attraverso cui avranno luogo, gli effetti connessi a una crescita costante della quantità di anidride carbonica nell'atmosfera produrranno quasi sicuramente squilibri. Un aumento nelle temperature medie della Terra si tradurrà probabilmente in un ampliamento delle zone aride e in sostanziali ripercussioni sulla produzione agricola.

L'altro corno del dilemma sta nel fatto che il genere di azioni correttive che potrebbero essere prese in considerazione avrebbero sicuramente conseguenze egualmente destabilizzanti. La più ovvia delle azioni correttive consisterebbe in una più drastica riduzione del consumo di combustibili fossili. Uguale importanza rivestirebbero misure volte a rallentare il ritmo con cui le foreste della Terra vengono ridotte o trasformate in radura in seguito a sfruttamento del legname, ad ampliamento dei terreni agricoli e da pascolo, a inquinamento e ad altre conseguenze dello sviluppo industriale. Un più energico sforzo per modificare la ripartizione tra l'uso agricolo e forestale delle estensioni di terreno in concomitanza con uno sforzo per limitare il consumo di combustibili fossili finirebbe per sconvolgere a tal punto i modelli consolidati di sviluppo sociale ed economico, da

produrre nelle condizioni umane alterazioni altrettanto drastiche di quelle probabilmente conseguenti a un riscaldamento del clima.

Benché il problema dell'anidride carbonica esista da oltre un secolo, è solo dal 1958 che si è entrati in possesso di dati inequivocabili circa le variazioni del contenuto atmosferico di questo composto. In quell'anno, Charles D. Keeling della Scripps Institution of Oceanography creò una stazione di rilevamento continuo dell'anidride carbonica sul vulcano Mauna Loa, nell'isola Hawaii. Il Mauna Loa fu scelto perché offriva la possibilità di studiare il contenuto di anidride carbonica nella troposfera, cioè nella parte inferiore dell'atmosfera, alle medie latitudini. Le registrazioni ora disponibili provenienti da Mauna Loa e da altre stazioni mostrano chiaramente due ordini di regolarità. In primo luogo, durante il periodo successivo al 1958 si è manifestata una regolare tendenza all'aumento del contenuto di anidride carbonica. Il valore dell'aumento a Mauna Loa è stato di circa 8 parti per milione per anno, anche se sono ovviamente intervenute variazioni nel tasso di tale incremento. In secondo luogo, si osserva una oscillazione sistematica del contenuto atmosferico di anidride carbonica in correlazione con l'avvicendamento delle stagioni. Il tenore di anidride carbonica tocca una punta massima in inverno inoltrato, che generalmente cade in aprile nell'emisfero settentrionale, e precipita a



L'annuale variazione della fissazione di anidride carbonica, caratteristica delle zone temperate, viene mostrata nelle immagini (riprese in estate e in autunno dal satellite Landsat) di una regione lungo il margine orientale delle Montagne Rocciose vicino a Boulder, Colorado. In questo tipo di fotografie, il verde della vegetazione appare rosso. Nell'immagine in alto, effettuata in agosto, il rosso intenso

dell'area a destra delle montagne, sulla sinistra, denuncia un massimo di attività fotosintetica, durante la quale le piante, per alimentarsi, assorbono anidride carbonica dall'atmosfera. Nell'immagine in basso, ripresa in ottobre, il rosso si è sostanzialmente attenuato, e ciò denota un rallentamento nell'attività fotosintetica. L'attività fotosintetica qui considerata si riferisce tanto a foreste quanto a piante coltivate.

un minimo verso la fine dell'estate settentrionale, a settembre inoltrato o a ottobre. I dati di Mauna Loa costituiscono la più lunga e accurata registrazione continuata del contenuto di anidride carbonica mai prima d'ora effettuate in alcuna parte del mondo.

Registrazioni della concentrazione di anidride carbonica sono state effettuate, in corrispondenza a vari periodi, al Polo Sud, in Australia, a Point Barrow in Alaska, a Long Island (New York) e in altre località. Ricercatori hanno eseguito estese campionature dell'atmosfera negli Stati Uniti, in Svezia, Australia e altrove a bordo di aerei. Tutti i dati mostrano un'oscillazione inverno-estate, con un minimo nella tarda estate e un massimo nel tardo inverno. Le oscillazioni seguono le stagioni di ciascun emisfero. I dati mostrano inoltre un aumento più o meno continuo del tenore atmosferico di anidride carbonica e l'entità di questo aumento varia, in funzione dell'epoca e della località, da circa 0,3 a 1,5 parti per milione per anno.

La variazione stagionale nella concentrazione atmosferica di anidride carbonica riflette uno dei principali fattori che influenzano l'atmosfera: il metabolismo del biota, ossia della totalità della materia vivente. Tale variazione stagionale è in correlazione con l'incremento della fotosintesi, che si verifica durante l'estate alle medie latitudini di entrambi gli emisferi. Recentemente è stata accettata come valida l'ipotesi che la causa prima-

ria della variazione stagionale è, con tutta probabilità, la variazione della fotosintesi nelle foreste delle medie latitudini. Viene attribuita importanza alle foreste perché, oltre a coprire estese superfici, svolgono su scala planetaria più attività fotosintetica di ogni altro tipo di vegetazione e sono in grado di immagazzinare carbonio in quantità sufficiente per influenzare il contenuto atmosferico di anidride carbonica.

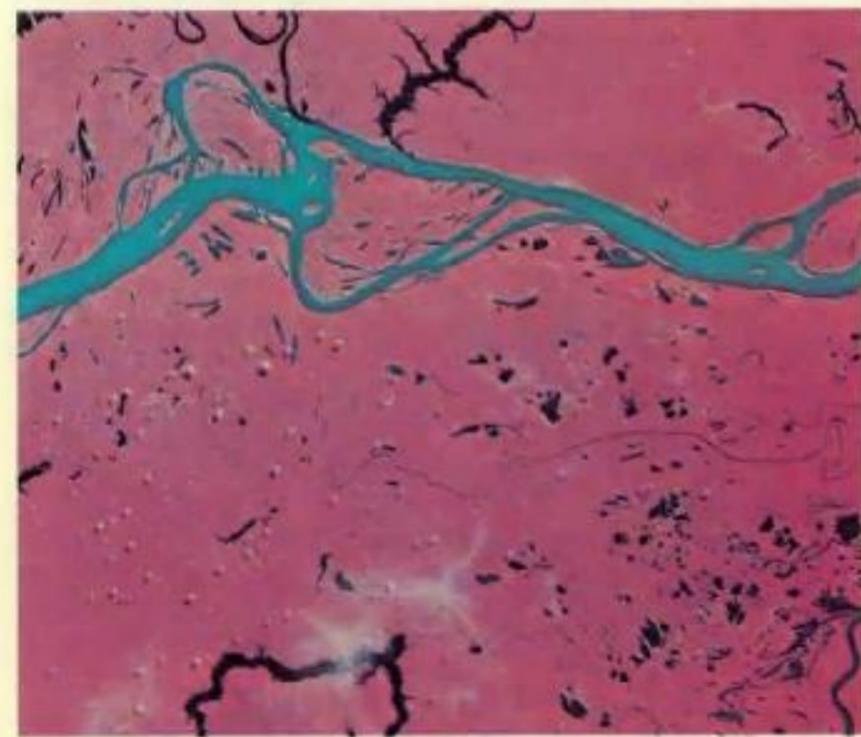
Le variazioni di ampiezza nella differenza tra le concentrazioni invernali e quelle tardo-estive di anidride carbonica sono coerenti con questa ipotesi. La differenza varia da circa cinque parti per milione a Mauna Loa a più di quindici parti per milione nel centro di Long Island. La differenza si attenua verso i tropici, dove la fluttuazione stagionale del metabolismo è meno pronunciata oppure assente; la differenza si indebolisce anche con l'elevarsi dell'altitudine a tutte le latitudini. L'ampiezza si riduce sostanzialmente nell'emisfero meridionale, apparentemente a causa della minore estensione di foreste conseguente alla più limitata massa di terre continentali. La conclusione cui chiaramente si giunge è che le foreste della Terra esercitano una spiccata influenza sull'andamento a breve termine della concentrazione di anidride carbonica nell'atmosfera.

La causa dell'aumento a lungo termine del contenuto atmosferico di anidride carbonica - aumento stimabile nell'ordine del 10-15 per cento dal 1850 - è stato

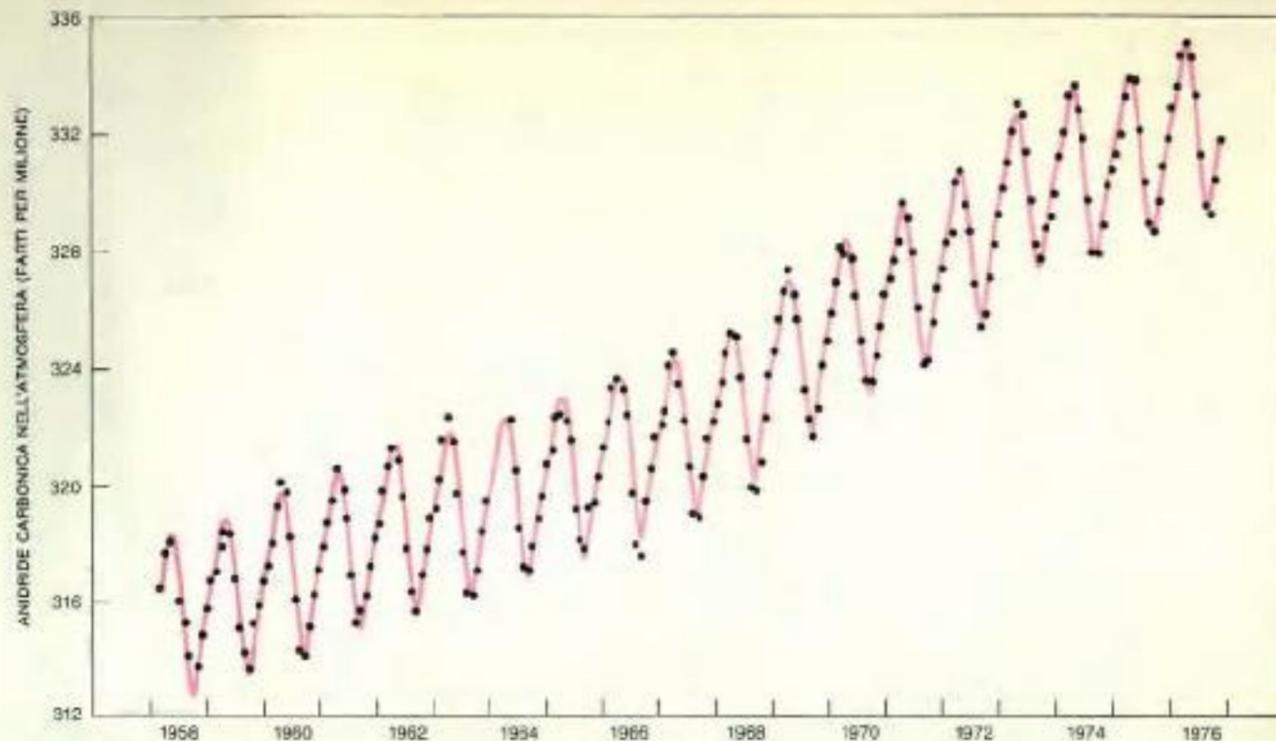
generalmente attribuito alla immissione, in continuo aumento, nell'aria di anidride carbonica attraverso il consumo di combustibili fossili. Recenti analisi hanno gettato dubbi su questa interpretazione. La probabilità che esista una rilevante introduzione addizionale di anidride carbonica nell'atmosfera a opera del biota è stata messa in luce da me insieme ad alcuni miei colleghi dell'Ecosystems Center del Marine Biological Laboratory a Woods Hole, Mass., in collaborazione con R.H. Whittaker e Gene E. Likens della Cornell University, W.A. Reiners del Dartmouth College e C.C. Delwiche dell'Università della California a Davis. Analoghe interpretazioni sono state pubblicate da altri ricercatori, specialmente da Bert Bolin dell'Università di Stoccolma e da J.R. Adams e dai suoi colleghi della Rice University. L'emissione a opera del biota è avvenuta principalmente in seguito alla distruzione di foreste e all'ossidazione dell'humus. La supposizione che l'aumento del contenuto atmosferico di anidride carbonica sia stata una conseguenza del consumo dei combustibili fossili, senza tener conto di possibili modificazioni nel biota, ha condotto a ciò che ora appare come un grave errore di calcolo nella costruzione del bilancio terrestre del carbonio.

L'inconveniente ha tratto origine dalle supposizioni che il biota abbia agito come un serbatoio di accumulo dell'anidride carbonica atmosferica, mentre in realtà esso si è probabilmente comportato come una fonte di liberazione nell'atmosfera di anidride carbonica. L'esistenza di questo probabile errore compromette al presente la possibilità di risolvere i principali quesiti inerenti al bilancio terrestre del carbonio. Se il biota non è stato un serbatoio di accumulo dell'anidride carbonica atmosferica e se l'assorbimento della stessa a opera degli oceani della Terra non è superiore a quanto si è supposto, allora la quantità di anidride carbonica presente nell'atmosfera dovrebbe essere in aumento anche più velocemente di quanto mostrano le osservazioni. Ovviamente le stime sono sbagliate. Ma dove sta l'errore?

Il problema può essere colto più chiaramente se si paragonano le grandezze dei «depositi» tra i quali avviene un reciproco scambio di carbonio in modo più o meno continuo. L'atmosfera contiene attualmente circa 700×10^{12} grammi di carbonio sotto forma di anidride carbonica la quale viene continuamente scambiata con il biota e con le acque di superficie degli oceani. La quantità di carbonio depositato nel biota terrestre complessivo ammonta a circa 800×10^{12} grammi, cioè è leggermente superiore alla quantità presente nell'atmosfera. Una quantità ancora maggiore di carbonio, variamente valutata tra i 1300×10^{12} e 2000×10^{12} grammi, è trattenuta nei materiali organici del suolo, principalmente humus e torba. Lo sfruttamento delle foreste, l'estendersi dell'agricoltura su terreni che contengono grandi quantità



L'area di foresta pluviale nel bacino amazzoniano del Brasile nordoccidentale che appare in questa immagine, ripresa dal Landsat, è quasi uniformemente rossa, a dimostrazione dell'intensa attività fotosintetica, lungo l'arco annuale, che caratterizza le foreste pluviali tropicali. Le comunità delle foreste naturali fissano più carbonio per unità di superficie che non la maggior parte delle piantagioni agricole. L'estensione di queste aree forestali si sta tuttavia riducendo.



L'andamento del contenuto atmosferico di anidride carbonica è stato misurato dal 1958 all'osservatorio di Mauna Loa, nell'isola Hawaii, da Charles D. Keeling della Scripps Institution of Oceanography. I puntini indicano la concentrazione media mensile. Le oscillazioni stagionali sono provocate dalla sottrazione di anidride carbonica per fotosintesi durante la stagione della crescita nell'emisfero settentrionale

e dalla successiva liberazione durante l'autunno e l'inverno. Le misurazioni effettuate a Mauna Loa e altrove mostrano che il contenuto medio di anidride carbonica nell'atmosfera è salito di più del 5 per cento dal 1958. La velocità di incremento è variata di anno in anno per cause non note. La velocità attuale è di una parte per milione per anno, equivalente a $2,3 \times 10^{12}$ grammi di carbonio.

di materiale organico e la distruzione di ambienti umidi sono tutti fattori che accelerano la degradazione dell'humus, il quale viene trasformato in anidride carbonica, acqua e calore. L'anidride carbonica liberata entra nel «deposito» atmosferico.

Rispetto a questi tre depositi in continua interazione e di dimensioni approssimativamente uguali, gli oceani raccolgono complessivamente una quantità di carbonio molto maggiore. La maggior parte del carbonio si trova sotto forma di anidride carbonica disciolta, che è parte del sistema carbonati-bicarbonati. Includendo i grandi bacini oceanici, la quantità totale di carbonio accumulata in questa forma è di $40\,000 \times 10^{12}$ grammi. Rispetto a una scala temporale misurata in migliaia di anni, il contenuto atmosferico di anidride carbonica potrebbe a ben ragione essere determinato dall'equilibrio stabilito con il carbonio inorganico delle acque profonde degli oceani. La velocità di scambio tra l'atmosfera e gli oceani nel loro complesso è tuttavia bassa. Gli scambi più rapidi intervengono tra l'atmosfera e lo strato superficiale di mescolamento, dello spessore approssimativo di 100 metri, che sovrasta le più fredde acque abissali. Lo strato superficiale contiene circa 600×10^{12} grammi di carbonio inorganico. Il deposito oceanico di carbonio secondo per vastità si trova sotto forma di mate-

ria organica disciolta (l'«humus» degli oceani) che sembra essere presente dovunque in ragione di una parte per milione, totalizzando una quantità che probabilmente arriva a 3000×10^{12} grammi considerando tutti gli oceani. Le acque profonde degli oceani superano ampiamente per volume le acque dello strato di mescolamento e racchiudono il deposito di carbonio di gran lunga più abbondante che sia in rapporto di scambio con l'atmosfera: da $35\,000 \times 10^{12}$ a $38\,000 \times 10^{12}$ grammi. (Non viene qui considerato il carbonio dei sedimenti carbonacei che ne contengono quantità assai più rilevanti.) La capacità delle regioni abissali di assorbire carbonio è virtualmente illimitata. Il fattore limitante è dovuto all'estrema lentezza con cui sembra avvenire il passaggio del carbonio dell'atmosfera verso le acque profonde attraverso lo strato superficiale degli oceani.

Quando si cerca di costruire un diagramma di flusso che indichi il trasporto netto di carbonio da un serbatoio all'altro, si scopre che le stime disponibili presentano ampi scostamenti qualitativi. I dati più accurati di cui si è in possesso si riferiscono all'anidride carbonica liberata sulla Terra attraverso il consumo di combustibili fossili, che attualmente equivale a 5×10^{12} grammi di carbonio ogni anno e all'aumento del contenuto atmosferico di anidride carbonica equivalente a circa $2,3 \times 10^{12}$ grammi di car-

bonio per anno. Ci sono quindi $2,7 \times 10^{12}$ grammi di carbonio proveniente da combustibili fossili che devono venire allontanati da una qualche combinazione di processi terrestri e oceanici. Limitiamoci a supporre, per il momento, che il biota terrestre rappresenti un serbatoio stabile di carbonio, cioè che non agisca nel senso di aumentare o di diminuire la quantità di anidride carbonica presente nell'atmosfera. In questo caso (di cui sosterrò l'improbabilità) gli oceani sono chiamati ad accogliere $2,7 \times 10^{12}$ grammi di carbonio ogni anno. La domanda che ci si deve porre è se questo tasso di assorbimento sia dimostrabile.

Secondo i calcoli più attendibili degli oceanografi chimici è difficile spiegare come possano gli oceani assorbire una tale quantità annualmente. Le loro analisi si basano su una conoscenza dettagliata della quantità di carbonio interrata nel sistema carbonati-bicarbonati dello strato superficiale e sulla costruzione di accurati modelli del meccanismo di mescolamento degli oceani. Gli isotopi radioattivi carbonio 14 e trizio (idrogeno 3), entrambi prodotti in grandi quantità durante gli esperimenti atomici degli anni cinquanta e dell'inizio degli anni sessanta, sono stati impiegati come traccianti per studiare la velocità con cui l'acqua dello strato di mescolamento si scambia con l'acqua degli strati profondi. Gli

studi sembrano indicare che la velocità di mescolamento è in verità molto bassa. Il trasferimento del carbonio dall'atmosfera allo strato superficiale e da questo alle acque abissali ha poca probabilità di superare, secondo alcuni colleghi, i $2,5 \times 10^{15}$ grammi per anno. In conclusione, gli oceani appaiono appena sufficienti a fungere da vaso di raccolta della differenza tra i 5×10^{15} grammi per anno di carbonio attualmente liberati nell'atmosfera bruciando combustibili fossili e i

$2,3 \times 10^{15}$ grammi che l'atmosfera trattiene. Questo bilancio di flussi deve essere completamente riesaminato se il serbatoio biotico di carbonio, anziché espandersi o essere in equilibrio netto con il carbonio dell'atmosfera, è in realtà una fonte netta di anidride carbonica per la atmosfera. Whittaker e Likens hanno recentemente ordinato in tabelle le informazioni attuali circa la dimensione dei diversi segmenti del biota. Dal loro lavoro

risulta che i più estesi serbatoi di carbonio in seno al biota sono le foreste. Risulta inoltre che la massima produzione fotosintetica si svolge sulle terre emerse e non negli oceani come prima era stato supposto sulla base di precedenti argomentazioni intorno alla velocità della produzione primaria netta negli oceani. (Per produzione primaria netta si intende la quantità netta residuale di carbonio fissato per fotosintesi, cioè di materia organica, una volta che sono state

soddisfatte le necessità respiratorie della pianta. Si tratta della materia organica utilizzabile per la crescita della pianta che viene poi immagazzinata o resa disponibile per gli organismi consumatori.) Forse il risultato più significativo dello studio di Whittaker e Likens è la dimostrazione che le foreste pluviali tropicali, con i loro grandi alberi, rappresentano il più grande serbatoio singolo di carbonio in seno al biota, oltre a detenere il primato assoluto della produzione totale

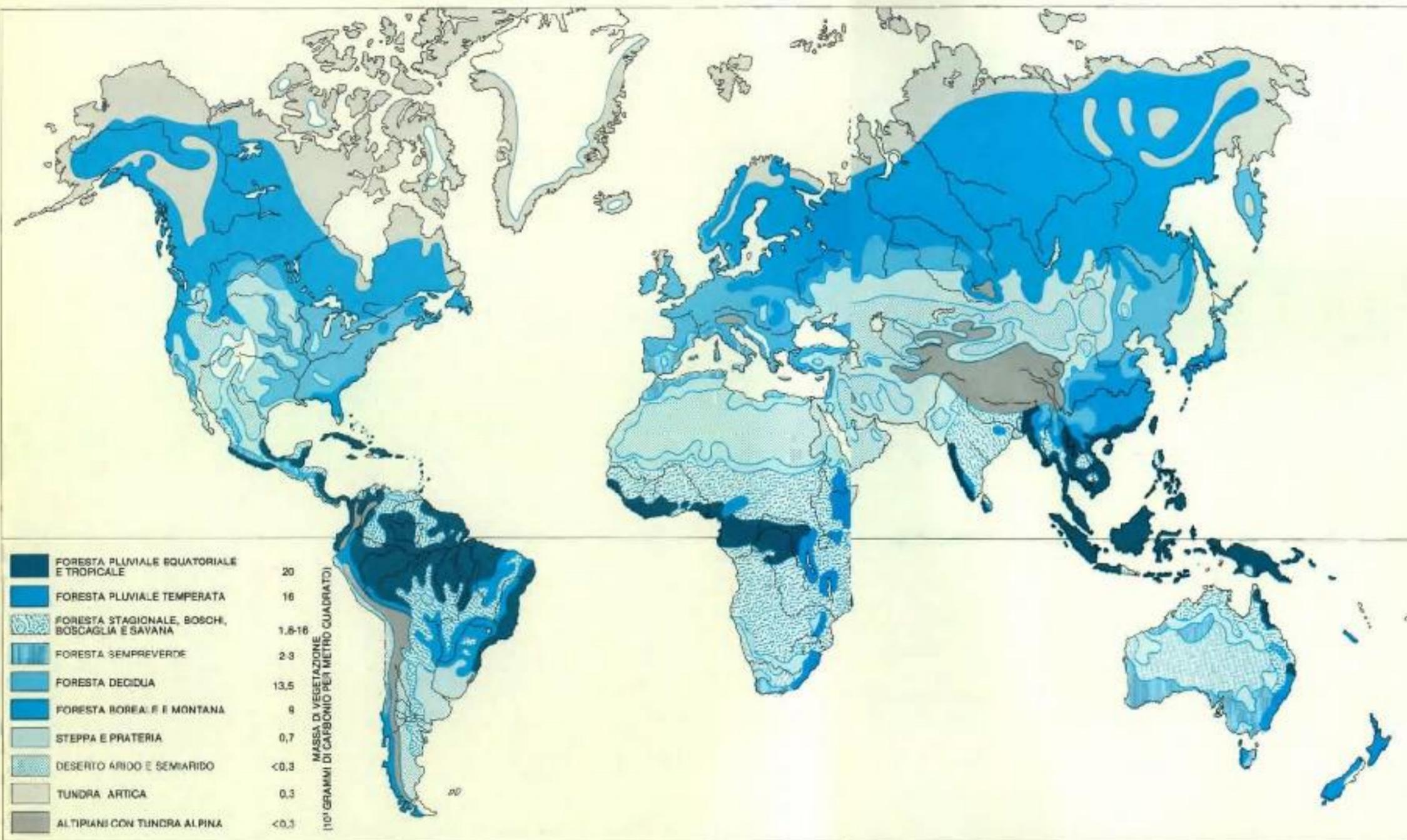
primaria netta. Questa considerazione sottolinea l'importanza delle foreste tropicali nel bilancio terrestre del carbonio. Se queste e altre foreste verranno tagliate rapidamente e se il carbonio in esse contenuto verrà liberato, esiste la concreta possibilità che venga significativamente influenzata la quantità di anidride carbonica nell'atmosfera. Per contro, se verrà permesso il rimboscimento dei terreni disboscati, le foreste assorbiranno parte dell'anidride carbonica dall'atmosfera

ra rallentando l'aumento della sua concentrazione. Curiosamente, solo in epoca recente sono sorte controversie circa il quesito se il serbatoio biotico si stia ingrandendo o rimpicciolendo. Per esempio, durante una conferenza nel 1970 intitolata «Study of Critical Environmental Problems» organizzata dal Massachusetts Institute of Technology e tenutasi a Williamstown, Mass., i relatori sostennero che il serbatoio biotico doveva essere in fase di espansione e incoraggiavano gli oceanografi a reputare adeguati i loro modelli di circolazione oceanica e di assorbimento dell'anidride carbonica.

La prima seria sfida al modello degli oceanografi fu lanciata attraverso due monografie presentate alla Conferenza Dahlem sulla biogeochimica tenutasi a Berlino Ovest nel novembre 1976. In una monografia, R.A. Houghton e io valutammo che il biota probabilmente libera ogni anno tanta anidride carbonica nell'atmosfera quanto quella prodotta nella combustione dei combustibili fossili. Nell'altra monografia, Bolin giunse a una valutazione leggermente inferiore per quanto riguarda il biota, prendendo spunto da dati sullo sfruttamento forestale raccolti dalla Food and Agriculture Organization (FAO) delle Nazioni Unite. Le stime di Bolin furono di circa 10^{15} grammi di carbonio liberati dal biota. Questo tema dominò la conferenza Dahlem, stimolando molte discussioni.

La possibilità che il biota contribuisca significativamente all'aumento nell'atmosfera di anidride carbonica dominò anche due successive conferenze, una allestita dal Department of Energy nel marzo 1977 a Miami Beach e l'altra svoltasi nell'aprile dello stesso anno a Ratzburg nella Germania Federale organizzata dall'International Council of Scientific Unions. Recenti articoli apparsi su «Science» e su altre pubblicazioni sostengono la conclusione che il biota sia una fonte netta di anidride carbonica atmosferica e non un serbatoio. I modelli degli oceanografi sono chiaramente in discussione. Che cosa significa tutto questo per il bilancio globale del carbonio?

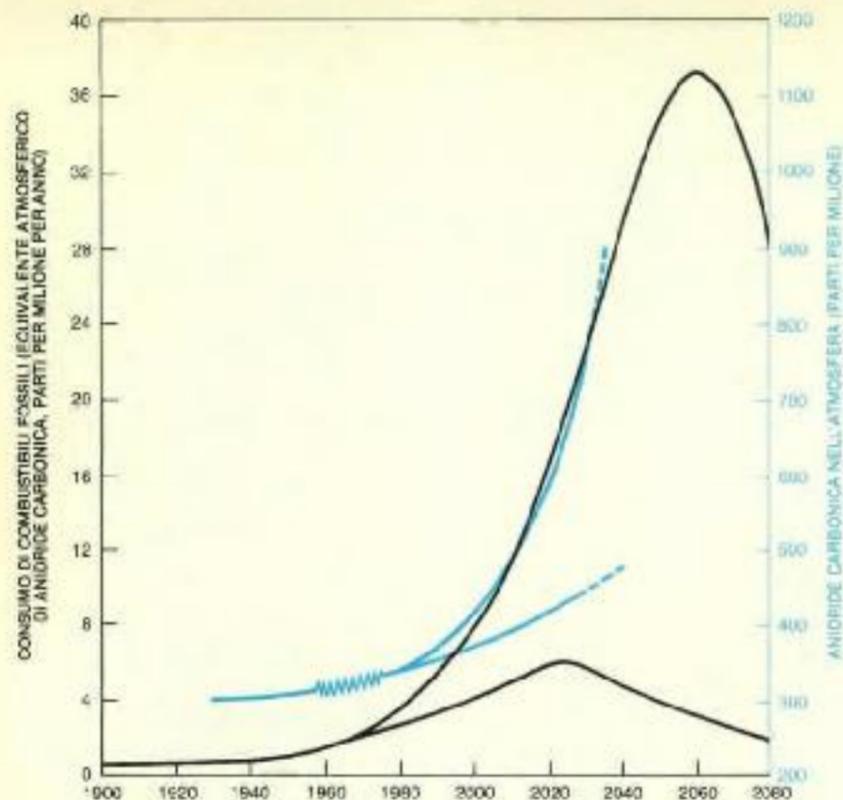
Si è ben lungi dal poter rispondere con chiarezza. Nell'atmosfera entrano quantità di carbonio sostanzialmente maggiori di quante ne vengano accumulate. Oltre ai 5×10^{15} grammi di carbonio provenienti annualmente dalla combustione dei combustibili fossili, altri, da 4×10^{15} a 8×10^{15} grammi, e forse più, possono venire liberati attualmente in conseguenza della distribuzione di foreste e dell'ossidazione accelerata di humus. Di questa quantità combinata variabile da 9×10^{15} a 13×10^{15} grammi di carbonio per anno, solo $2,3 \times 10^{15}$ grammi si accumulano nell'atmosfera. I restanti 7×10^{15} - 11×10^{15} grammi, e forse più, vengono immagazzinati da qualche parte sulla Terra. Ma dove? Come abbiamo visto, gli attuali modelli relativi all'assorbimento da parte degli oceani rendono conto dell'allontanamento di meno di 3×10^{15} grammi di carbonio per anno. Gli oceanografi stan-



Il carbonio accumulato nelle piante è distribuito come indicato in questa mappa terrestre basata sul lavoro di H. Brockmann Jerosch. La quantità totale di carbonio che si trova racchiuso nella biomassa

terrestre è di circa 830×10^{15} grammi. In confronto, il carbonio contenuto nella biomassa complessiva degli oceani è trascurabile: meno di 2×10^{15} grammi. Circa il 40 per cento di tutto il carbonio contenuto

nelle piante è immagazzinato nella foresta pluviale tropicale. Un altro 14 per cento è trattenuto nelle foreste tropicali stagionali. A tutte le latitudini le foreste racchiudono circa il 90 per cento di tutto il carbonio accumulato negli ecosistemi planetari, sia terrestri sia marini.



Previsioni circa il consumo di combustibili fossili (curve in nero) e il contenuto atmosferico di anidride carbonica (curve in colore) in funzione dei tassi di incremento minimi e massimi plausibili. I tassi di consumo dei combustibili sono ricavati da un recente studio effettuato presso l'Oak Ridge National Laboratory. Le proiezioni di «minimo» assegnano un incremento annuo del 2 per cento fino al 2025, seguito da un decremento simmetrico. Le proiezioni di «massimo» assegnano un tasso di crescita del 4,3 per cento per anno fino a che quest'ultima verrà limitata dall'impovertimento di risorse verso la metà del prossimo secolo. L'incertezza viene pesantemente aggravata dalla possibilità, recentemente riconosciuta, che la distruzione di foreste possa anche causare la liberazione di grandi quantità di anidride carbonica nell'atmosfera. La parte della curva a dente di sega rappresenta le misurazioni compiute a Mauna Loa a partire dal 1958. Attualmente, i combustibili fossili che ogni anno vengono bruciati liberano nell'atmosfera una quantità di anidride carbonica equivalente a circa 2 parti per milione. Circa la metà di questa quantità viene trattenuta nell'atmosfera.

no ora rivedendo le proprie supposizioni per scoprire se hanno trascurato eventuali meccanismi capaci di catturare l'eccesso di carbonio.

Data l'importanza del problema, coloro che si occupano di ecosistemi terrestri stanno ora attentamente esaminando i propri dati, particolarmente quelli relativi ai cambiamenti nella massa forestale. Come possiamo essere certi che le comunità terrestri siano in realtà una fonte e non un serbatoio? Il problema è stato recentemente affrontato in diversi modi. I dati non sono così attendibili come si potrebbe sperare, ma essi appaiono vincolanti per coloro che li padroneggiano.

L'analisi si basa in primo luogo sulla conoscenza delle grandezze relative dei serbatoi di carbonio in seno al biota e sulla produzione netta di ciascuna delle principali comunità di piante sulla Terra. Per esempio, lo studio di Whittaker e Likens mostra che la foresta pluviale tropicale contiene circa il 42 per cento di

tutto il carbonio incorporato nella vegetazione terrestre e contribuisce per il 32 per cento alla produzione primaria netta complessiva. Le aree forestali, di tutti i tipi - tropicale, temperato, boreale - racchiudono il 90 per cento di tutto il carbonio contenuto nella vegetazione e contribuiscono per il 60 per cento alla produzione primaria netta. L'unico altro importante contributore singolo alla produzione primaria netta è la savana più o meno alberata con una quota del 12 per cento, contro soltanto circa il 3 per cento quanto a massa di carbonio incorporata. Tutte le terre coltivate dei continenti concorrono nella misura dell'8 per cento alla produzione primaria netta totale e nella misura di meno dell'1 per cento alla massa di carbonio incorporata. Le stime di Whittaker e Likens si collocano circa a metà strada tra gli estremi dei risultati di altre analisi presentate alla conferenza di Ratzeburg e che furono effettuate sotto la direzione di P. Duvigneaud dell'Università di Bruxelles. Poiché tutti i differenti studi confermano l'importanza

delle foreste, particolarmente delle foreste tropicali, è essenziale stabilire se questi ecosistemi stanno cambiando in dimensione e, nel caso affermativo, con quale intensità.

I dati sono scarsi. Esiste l'esperienza di Henry C. Darby, un geografo inglese che nel 1954 pubblicò una valutazione circa i cambiamenti nella vegetazione forestale dell'Europa durante il millennio fra il 900 d.C. e il 1900. Nel corso di questo periodo, la copertura forestale dell'Europa occidentale si era ridotta da circa il 90 per cento a circa il 20 per cento. Una simile modificazione intervenne in epoca precedente nelle regioni del Mediterraneo, particolarmente nel levante. In seguito a questa imponente riduzione dell'area forestale, fu liberata una quantità di carbonio tale da costituire una frazione significativa del carbonio precedentemente contenuto nell'atmosfera. È ragionevole pensare che, a partire dal 1900, la continua industrializzazione e la crescita della popolazione abbiano prodotto simili cambiamenti nelle rimanenti foreste.

Timothy Wood e Daniel B. Botkin, dell'Ecosystems Center a Woods Hole, hanno recentemente compiuto uno studio sui cambiamenti intervenuti nell'area forestale del New England a partire dall'epoca dell'arrivo dei coloni europei. Essi hanno trovato che fino al 1900 si verificò una continua riduzione nella produzione totale fissa delle foreste, ma che, da quel momento, iniziò un periodo di ripristino conseguente all'abbandono dell'agricoltura e alla penetrazione di foreste nei terreni precedentemente coltivati. Tale ripristino, tuttavia, non è stato tale da ristabilire un serbatoio di carbonio equivalente a quello delle foreste originarie. Le foreste sono state regolarmente sfruttate e non hanno mai raggiunto l'altezza e l'estensione di quelle di origine: la produzione fissa di carbonio non va oltre la metà di quella originaria. I dati più recenti indicano che l'allargamento dell'area forestale si è ora arrestata probabilmente a causa di una rinnovata espansione dell'agricoltura e di un intensificato sfruttamento degli alberi.

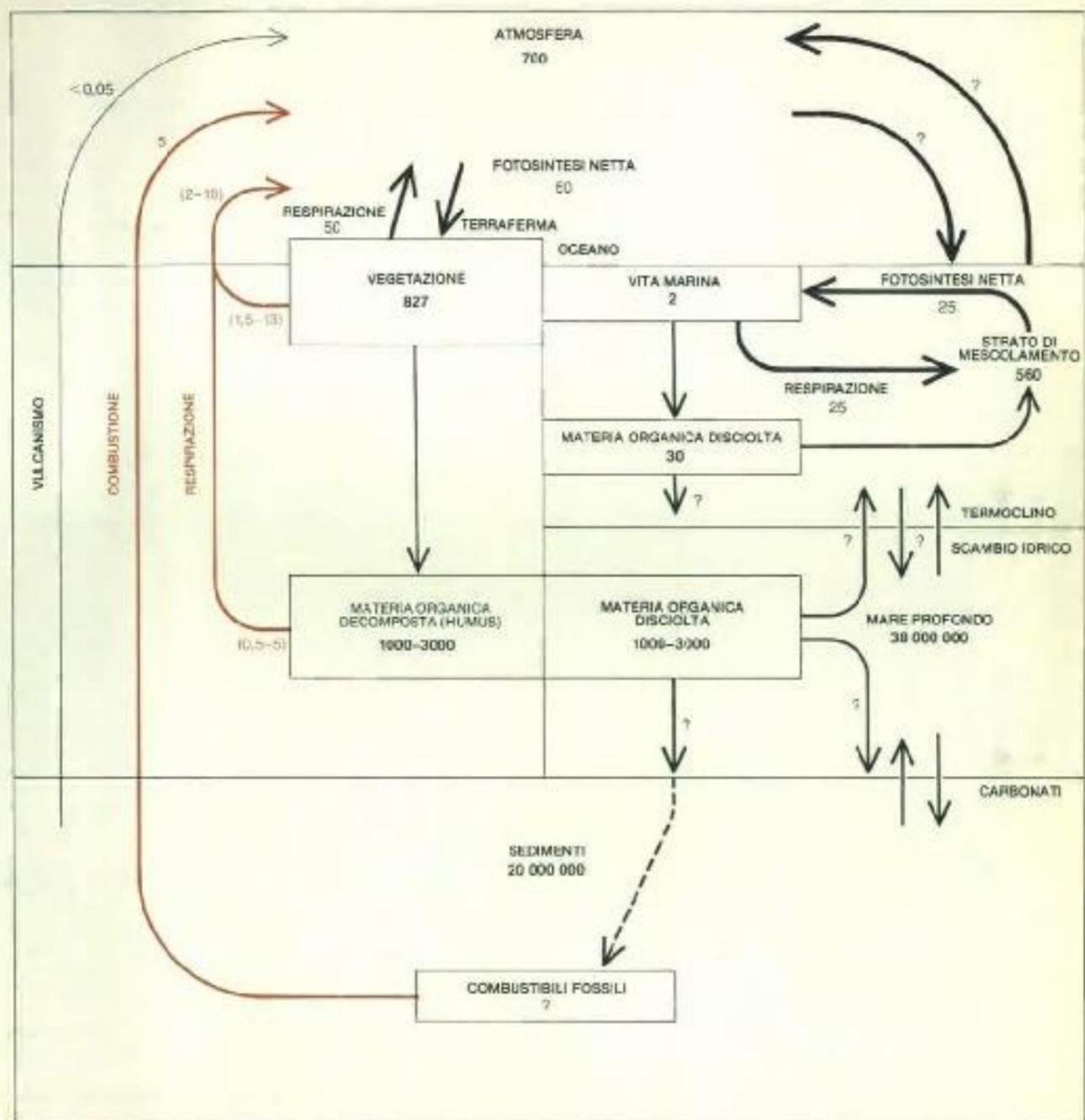
Lo studio di Wood e Botkin mostra che in una foresta della zona temperata, lasciata in condizione di rigenerarsi da uno sfruttamento intensivo, l'accumulo di carbonio toccava una percentuale del 3 o 4 per cento per anno della produzione primaria netta lungo l'intero periodo del ripristino, circa 70 anni. Se in altre foreste della zona temperata si verificasse un accumulo corrispondente a una frazione simile della produzione primaria netta e se un'analoga quantità addizionale di carbonio si accumulasse nell'humus, la quantità di carbonio accumulata in tutte le foreste della zona temperata della Terra raggiungerebbe, annualmente, il valore di $0,5 \times 10^{12}$ grammi. L'esperienza maturata con le foreste del New England suggerisce che la ricrescita di foreste nelle zone temperate probabilmente non costituisce attualmente un

grande serbatoio per l'anidride carbonica atmosferica.

Nel frattempo, vi è stata una continua espansione dell'agricoltura in altri territori forestali, un continuo sfruttamento

di foreste primarie, un generale inquinamento della Terra in seguito alle attività umane. Le più cospicue irruzioni in ambienti forestali si sono verificate nelle zone tropicali. La più estesa zona rico-

perta da foreste che rimane sulla Terra è il bacino amazzonico e per tale motivo siamo andati in cerca di dati sulla velocità di sfruttamento della foresta amazzonica. Non esistono indagini che, con



Schema del bilancio globale del carbonio che ne mostra i principali «serbatoi» e le velocità di scambio annuale tra i serbatoi che sono in contatto. Le quantità sono espresse in unità di 10^{12} grammi, o miliardi di tonnellate. Le immissioni complessive nell'atmosfera controllate dalle attività umane appaiono in colore. Le piante terrestri fissano una quantità netta di circa 50×10^{12} grammi di carbonio per anno. Questo carbonio viene sia consumato e immediatamente respirato dai vari organismi terrestri, sia immagazzinato nella massa delle piante. Il bilancio tra fissazione (fotosintesi netta) e immagazzinamento esteso a tutti gli organismi terrestri determina il fatto che vi sia un flusso netto di anidride carbonica verso o dal biota. Molti biologi sono ora del parere che vi sia stato un flusso netto a lungo termine di anidride

carbonica dal biota nell'atmosfera e che tale flusso si mantenga. Il carbonio fissato dagli organismi marini viene sia respirato sia immagazzinato. Si ritiene comunemente che la maggior parte di esso venga immediatamente respirata e riciclata. È possibile che l'affondamento delle particelle fecali trascini nelle profondità oceaniche più carbonio di quanto sia stato supposto, il che integrerebbe la normalmente lenta diffusione di anidride carbonica negli strati superficiali degli oceani, dove essa entra in equilibrio con il sistema carbonati-bicarbonati. Anche se le profondità oceaniche costituiscono un serbatoio praticamente illimitato l'anidride deve prima entrare nello strato di mescolamento e poi nel termoclino, strato caratterizzato da stratificazione termica che impedisce il mescolamento con gli strati più profondi.

sufficiente approssimazione, possano essere applicate all'intero bacino amazzonico senza incorrere in tutti quei rischi che sono connessi con ogni estrapolazione. In ogni caso, Lawrence S. Hamilton della Cornell University e i suoi colleghi hanno recentemente pubblicato una serie di relazioni sulle modificazioni della foresta in territorio venezuelano.

Una delle relazioni, di cui è autore J. P. Veillon, indica che, tra il 1950 e il 1975, si è avuta una riduzione del 33 per cento nella superficie a foresta delle pianure occidentali del Venezuela. Hamil-

ton, in una introduzione alla serie di relazioni, riporta dati della FAO che «suggeriscono un ritmo di disboscamento annuale della foresta umida compreso fra lo 0,6 e l'1,5 per cento della superficie ancora esistente». Studi compiuti su altri settori del bacino amazzonico testimoniano dell'elevato ritmo di sviluppo di autostrade, dell'espansione dell'agricoltura a scapito della foresta e della mancanza di ripristino di vegetazione dopo che la foresta è stata disboscata. Praticamente, nessuno studioso bene informato e competente per quanto riguarda le zo-

ne tropicali sostiene che la foresta amazzonica potrà sfuggire a interferenze considerevoli connesse allo sfruttamento di legname e all'apertura di radure durante i prossimi 30 anni.

Le migliori ipotesi di cui si dispone indicano che il tasso di disboscamento delle foreste tropicali per qualunque finalità è probabilmente compreso tra lo 0,5 e l'1,5 per cento della superficie esistente annualmente. Supponendo un tasso dell'1 per cento e ammettendo che la maggior parte del disboscamento sia connessa all'espansione dell'agricoltura e di terreni da pascolo entro zone precedentemente coperte da foreste, la quantità di carbonio che sarebbe resa libera dalla sola riduzione di foreste si aggirerebbe annualmente intorno a $4,5 \times 10^{15}$ grammi. Applicando queste previsioni all'intero biota terrestre e tenendo conto di un accumulo addizionale dovuto a ricrescita, i miei colleghi e io abbiamo recentemente valutato che la liberazione netta di anidride carbonica nell'atmosfera da parte del biota sia di 6×10^{15} grammi di carbonio per anno. L'entità di una cessione addizionale in seguito alla decomposizione di humus è difficile da calcolare, tuttavia abbiamo stimato che la perdita sia su livelli di 2×10^{15} grammi per anno. La liberazione totale di carbonio è pertanto stimabile in circa 8×10^{15} grammi per anno. Le incertezze sono tuttavia così ampie da indurci ad avanzare la supposizione che l'effettiva perdita in seno al biota potrebbe oscillare tra 2×10^{15} e 18×10^{15} grammi per anno. Anche se occorre tenere sempre presenti i limiti dei dati su cui si basano tali supposizioni, è difficile evitare la conclusione che la distruzione di foreste sulla Terra finisca col provocare un'aggiunta di anidride carbonica nell'atmosfera a una velocità paragonabile a quella con cui lo stesso composto viene liberato per combustione dai combustibili fossili, velocità che assumerebbe valori sensibilmente più elevati qualora venisse compresa l'ossidazione dell'humus.

Queste considerazioni sono state accolte con sorpresa da molti esperti di problemi agricoli e forestali. L'ipotesi di riferimento nella loro esperienza è stata quella secondo cui le moderne pratiche agricole e forestali abbiano incrementato la produttività primaria netta dei sistemi terrestri sotto il controllo umano e che tale incremento debba essersi tradotto in un accumulo di carbonio più veloce nell'humus dei terreni controllati rispetto a quelli naturali. Tuttavia, la produttività media dell'agricoltura misurata secondo le unità degli ecologi, in termini di materia organica totale disponibile per l'uomo o per gli altri animali, è sostanzialmente inferiore alla produttività primaria media delle comunità naturali soppiantate dall'agricoltura. Le comunità di piante agricole non sono sfruttate col fine di rendere rapido l'avvicendamento di serbatoi di carbonio durante la loro utilizzazione da parte dell'uomo. Ciò significa che i terreni adibiti a uso agricolo

non accumulano tanto carbonio quanto le foreste che hanno rimpiazzato. Analogamente, le praterie convertite all'agricoltura tendono a perdere i materiali organici del terreno per decomposizione e non ad accumularne di addizionali.

Le foreste sfruttate in modo intensivo, anche se possono produrre una quantità maggiore di legno, tendono ad avere, al tempo della raccolta del legname, un rendimento fisso molto inferiore a quello delle foreste primarie di cui hanno preso il posto. Ciò nuovamente significa che il tempo di avvicendamento è stato ridotto e che la «dotazione» fissa di carbonio non raggiunge mai la stessa entità raggiunta nelle foreste originarie. Pertanto, la sostituzione di foreste primarie con foreste secondarie sfruttate come fonte di legname e di pasta di legno ha come risultato una liberazione netta di anidride carbonica. Un'altra fonte netta di anidride carbonica è la decomposizione dell'humus. La decomposizione viene stimolata dall'intervento di raccolta del legname e può protrarsi parecchi anni dopo tale raccolta, durante i primi stadi della successione di specie che seguono l'abbattimento. Tutti questi fattori producono una fuoriuscita netta di carbonio in tutti i casi in cui una foresta vergine primaria viene rimpiazzata da una foresta secondaria sfruttata dall'uomo.

Un'altra circostanza sembra dare sostegno alla conclusione che il biota terrestre è stato per molti decenni una fonte netta di anidride carbonica piuttosto che un serbatoio di accumulo. Confrontando i rapporti tra gli isotopi del carbonio in alcuni alberi, Minze Stuiver, dell'Università di Washington, ha calcolato che nel secolo compreso tra il 1850 e il 1950 il biota sembra aver lasciato liberi nell'atmosfera $1,2 \times 10^{15}$ grammi di carbonio per anno. Nello stesso periodo, le emissioni connesse ai combustibili fossili sono state in media di 6×10^{15} grammi di carbonio per anno.

Stuiver sfruttò la circostanza per cui il rapporto tra il carbonio 12 e il carbonio 13 varia tra l'atmosfera, il biota e i combustibili fossili. Il biota e i combustibili fossili sono leggermente più ricchi dell'isotopo più leggero, carbonio 12. Inoltre, si verifica che un terzo isotopo del carbonio, il carbonio 14, si produce negli strati superiori dell'atmosfera in seguito al bombardamento da parte dei raggi cosmici dell'isotopo comune dell'azoto, azoto 14. Esso è stato anche prodotto in grandi quantità nel corso degli esperimenti nucleari nell'atmosfera. Poiché il carbonio 14 ha una emivita di circa 6000 anni, è scomparso da lungo tempo dai combustibili fossili, la cui epoca di formazione risale a milioni di anni fa. Dalla combustione dei combustibili fossili, si libera una «partita» di carbonio deficiente di carbonio 14, che tende a diluire il carbonio 14 nell'atmosfera. Misurando la concentrazione di differenti isotopi del carbonio negli anelli di alberi di età conosciuta e confrontandone i rapporti con quelli relativi all'atmosfera e ai combustibili fossili, Stuiver è stato in grado di

stimare la quantità di carbonio fuoriuscita dal biota. Le misure sono tecnicamente difficili da eseguire; inoltre, i rapporti tra gli isotopi del carbonio negli alberi sono influenzati da numerosi fattori ambientali che rendono i risultati meno netti di quanto si vorrebbe. Nonostante, questa tecnica fornisce un importante metodo addizionale per valutare l'entità della fuoriuscita di anidride carbonica dal biota.

Alla luce dell'evidenza, difficilmente si può mettere in discussione il fatto che l'aumento del tenore atmosferico di anidride carbonica dipende non solo dalla combustione di combustibili fossili, ma anche dalla distruzione di foreste. G. Evelyn Hutchinson, della Yale University, fece questa considerazione in un capitolo di *The Earth as a Planet* un libro pubblicato da Gerard P. Kuiper nel 1954. Hutchinson fece la supposizione che la quantità di carbonio resa libera dal biota fosse circa uguale a quella emessa in seguito alla combustione di combustibili fossili. Le indicazioni più attendibili che possediamo suggeriscono che questa relazione sussiste.

C'è abbastanza carbonio trattenuto nel biota perché tale relazione si mantenga per un altro decennio o due, in concomitanza col previsto picco nei consumi mondiali di petrolio. Per quell'epoca, se non prima, la Terra sarà stata sospinta verso cambiamenti climatici come conseguenza dell'accumulo di anidride carbonica nell'atmosfera - a patto che tali cambiamenti si verifichino realmente. Il fatto che ciò accada, oppure no, dipenderà dalla scala dell'effetto che produrrà l'anidride carbonica, una stima che è estremamente difficile da formulare con qualche sicurezza. Ora si sa che il clima è influenzato da cambiamenti nell'emissione solare, da cambiamenti nella riflettività terrestre e da altri fattori. Rimane da verificare se il contenuto atmosferico di anidride carbonica sarà abbastanza elevato da porsi come fattore determinante. Se l'effetto dell'anidride carbonica sarà veramente dominante, è probabile che la Terra si riscalderà in modo differenziale, con aumenti di temperatura crescenti verso i poli. È presumibile che un simile cambiamento possa sospingere le zone desertiche verso i poli, ampliano le regioni aride e restringendo le regioni adatte all'agricoltura. Tale prospettiva non è certo incoraggiante per un mondo la cui popolazione umana potrà forse raddoppiare nei prossimi 30-35 anni.

Se si fosse sicuri dell'eventualità di un cambiamento climatico preoccupante nei prossimi decenni il corso da impartire alle azioni sarebbe abbastanza chiaro. La combustione di combustibili fossili verrebbe contenuta, così da limitare questa fonte di anidride carbonica. Energetiche iniziative verrebbero inoltre intraprese per impedire lo sfruttamento di foreste primarie in tutto il mondo, per ampliare le aree destinate a foreste e per permettere a queste aree di sviluppare alberi di elevato rendimento fisso. È as-

sai dubbio se queste drastiche misure potrebbero venire messe in pratica; i problemi sociali che comporterebbero sarebbero evidentemente profondi.

Altri suggerimenti sono stati avanzati, compreso il seguente: poiché la disponibilità di fosforo è da qualcuno considerata fattore limitante della produzione primaria netta negli oceani, le nazioni avanzate dovrebbero destinare una parte della propria energia industriale all'estrazione del fosforo, con lo scopo di trasferirlo il più rapidamente possibile agli oceani relativamente infertili, così, da simulare l'attività fotosintetica e l'accumulo di carbonio. Questo progetto è superficialmente attraente, in quanto sembra fornire un mezzo per accelerare l'accumulo di carbonio nel mare. Esiste tuttavia la possibilità che ogni incremento di fotosintesi indotto negli oceani venga annullato da un equivalente intensificazione della respirazione, per cui non si verificherebbe alcun arricchimento netto di carbonio. Esistono molti interrogativi circa la realizzabilità di questo intervento, compreso quello, fondamentale, che nasce dalla domanda se il fosforo sia veramente un fattore limitante critico nelle acque degli oceani. Esiste una possibilità ragionevole che anche l'azoto sia un fattore limitante, nel qual caso la stimolazione della fotosintesi nel mare potrebbe rivelarsi sostanzialmente più difficile di quanto supposto.

Tuttavia, recenti esperienze hanno sottolineato all'attenzione di tutti noi che lavoriamo in questi campi il fatto che attualmente rimangono ancora in gran parte sconosciuti importanti aspetti del bilancio terrestre del carbonio. Si potrebbe progredire nella conoscenza di questi aspetti attraverso un rilevamento dei cambiamenti nelle zone di diffusione e nella struttura delle foreste in tutta la Terra per mezzo di fotografiche riprese da satelliti. Si stanno anche compiendo indagini per stabilire se certi meccanismi biotici potrebbero facilitare il trasferimento di carbonio nelle profondità oceaniche in quantità considerevolmente maggiori di quanto supponiamo avvenga attualmente, ma la prospettiva immediata di conoscere tutti gli aspetti del bilancio terrestre del carbonio non è brillante.

I rischi potenziali connessi a un aumento costante nel contenuto atmosferico di anidride carbonica si manifesteranno gravi nei prossimi decenni e imporranno senza dubbio pesanti ipoteche su decisioni quali quella se si debba intensificare lo sviluppo di centrali nucleari invece di quelle a combustibili fossili e se si debbono conservare le aree forestali invece di esercitarvi interferenze. Quasi non esistono aspetti di politica nazionale e internazionale che possano non rimanere coinvolti dalla prospettiva di una modificazione climatica globale. Può darsi che l'anidride carbonica, finora considerata un gas innocuo presente in tracce nell'atmosfera, vada a collocarsi in una posizione cruciale di minaccia nei confronti dell'attuale ordine mondiale.

AREA (10 ⁶ CHILOMETRI QUADRATI)	PRODUZIONE PRIMARIA NETTA (10 ¹⁵ GRAMMI DI CARBONIO PER ANNO)	MACCIA VEGETALE (10 ¹⁵ GRAMMI DI CARBONIO)
FORESTA PLUVIALE TROPICALE	17,0	16,8
FORESTA STAGIONALE TROPICALE	7,5	5,4
FORESTA TEMPERATA SEMPREVERDE	8,0	2,9
FORESTA TEMPERATA DECIDUA	7,0	3,6
FORESTA BOREALE	12,0	4,3
BOSCHI E BOSCIAGLIA	8,5	2,7
SAVANA	15,0	6,1
PRATERIA TEMPERATA	3,0	2,4
TUNDRA E PASCOLI ALPINI	3,0	0,5
VEGETAZIONE DESERTICA	18,0	0,1
ROCCHE, GHIACCIO E SABBIA	24,0	0,03
TERRA COLTIVATA	14,0	4,1
PALUDI E ACQUITRINI	2,0	2,7
LAGHI E CORSI D'ACQUA	2,0	0,4
TOTALE CONTINENTALE	149,0	82,8
MARE APERTO	332,0	18,7
ZONE DI RISALITA	0,4	0,1
PIATTAFORMA CONTINENTALE	26,6	4,3
LETTO DI ALGHE E SCORFIERA	0,6	0,7
ESTUARI	1,4	1,0
TOTALE OCEANICO	361,0	21,8
TOTALE MONDIALE	510,0	77,6

Le principali comunità di piante della Terra sono classificate secondo la loro estensione, la loro produzione primaria netta e la quantità di carbonio che incorporano. La produzione primaria è la quantità di carbonio che una comunità di piante rende annualmente disponibile per essere raccolta o per fuggire da nutrimento a numerosi organismi consumatori, sia selvatici che domestici. Anche se soltanto il 30 per cento circa della Terra è costituito da terre emerse, la produzione primaria netta della vegetazione continentale è leggermente più che doppia rispetto alla produzione primaria della vegetazione marina. La quantità di carbonio accumulata nelle piante terrestri è circa 500 volte maggiore di quella accumulata negli ecosistemi marini ed è approssimativamente uguale alla quantità di carbonio presente nell'atmosfera. I dati in tabella sono stati recentemente compilati da R.H. Whittaker e Gene F. Likens della Cornell University.