

MARCO BORGHETTI (\*)

## L'ECOLOGIA GLOBALE DELLE FORESTE (1)

*Si mostra come le ricerche degli ultimi vent'anni sul bilancio del carbonio delle foreste abbiano consentito: l'individuazione di rilevanti processi di assorbimento dell'anidride carbonica atmosferica negli ecosistemi forestali, comprese le foreste primarie; il riconoscimento della respirazione ecosistemica come componente decisiva del bilancio del carbonio; l'apprezzamento della variabilità interannuale dei processi di scambio e della loro regolazione da parte delle condizioni ambientali; il riconoscimento che la capacità di assorbimento delle foreste e della biosfera può essere indebolita da fattori di disturbo e che alcune componenti ecosistemiche, come i suoli, sono vulnerabili e potrebbero restituire all'atmosfera parte della gran quantità di carbonio accumulata nel corso dei secoli. Si evidenzia, peraltro, che diversi aspetti del funzionamento ecosistemico e delle interazioni fra i fattori del cambiamento globale, in primo piano la relazione fra i cicli del carbonio e dell'azoto, richiedono una migliore interpretazione, e che i modelli di circolazione generale rappresentano in modo ancora inadeguato alcuni processi che potrebbero essere decisivi nella regolazione degli scambi di materia ed energia fra biosfera e atmosfera. Per questi motivi esiste ancora incertezza sul ruolo che, negli anni a venire, le foreste e la biosfera svolgeranno nella mitigazione dell'effetto serra e del cambiamento climatico.*

*Parole chiave:* foresta; biosfera; carbonio; azoto; cambiamento globale; clima.

*Key words:* forest; biosphere; carbon; nitrogen; global change; climate.

*Stat silva pristina, nomina nuda tenebimus?*

### PREMESSA

La consapevolezza che i processi che hanno luogo nella biosfera influenzano lo stato dell'atmosfera e l'andamento del clima è un «frutto» relativamente recente della ricerca ecologico-ambientale. Le foreste sono una delle principali componenti della biosfera terrestre: ricoprono una superficie di oltre quaranta milioni chilometri quadrati – circa il trenta per

---

(\*) Cattedra di Ecologia forestale e Selvicoltura, Dipartimento di Scienze dei Sistemi colturali, forestali e dell'Ambiente, Università degli Studi della Basilicata, viale dell'Ateneo Lucano 10, I-85100 Potenza; marco.borghetti@unibas.it

<sup>1</sup> Testo della prolusione tenuta in occasione dell'inaugurazione del 58° anno accademico dell'Accademia Italiana di Scienze Forestali. Ringrazio sentitamente il Presidente dell'Accademia, prof. Orazio Ciancio, per la stima che mi ha dimostrato affidandomi il prestigioso incarico.

cento delle terre emerse – e contengono il quarantacinque per cento del carbonio terrestre; possono quindi determinare in misura elevata gli scambi di materia ed energia fra biosfera e atmosfera, sia attraverso assorbimenti che riducono la concentrazione atmosferica dei gas responsabili dell'effetto serra e del riscaldamento climatico, sia con processi di restituzione e altri effetti biofisici che potrebbero invece rinforzarlo (BONAN, 2008).

Nell'ultimo ventennio è stata dedicata crescente attenzione a questi temi e si è di fatto costituita una disciplina – l'ecologia globale delle foreste – che ha sviluppato metodi e strumenti per capire come le foreste funzionano e quale ruolo svolgono nell'ambito delle dinamiche ambientali planetarie. I risultati conseguiti hanno permesso di mettere in discussione vecchi paradigmi e di formulare ipotesi nuove, contribuendo alla definizione degli indirizzi di politica ambientale.

Cercherò, in questa sede, di mettere in luce parte dei risultati ottenuti nel corso di questi studi, ma anche di evidenziare le incertezze che tuttora permangono e la necessità di perfezionare i modelli interpretativi su specifici aspetti del rapporto funzionale fra foreste (biosfera) e atmosfera.

#### UNA MISURA IMPORTANTE: IL BILANCIO DEL CARBONIO DELLE FORESTE

I progressi fatti nella comprensione del funzionamento delle foreste e del loro ruolo nel determinare gli scambi di energia e di materia con l'atmosfera sono legati, in buona parte, alla possibilità di misurarne in modo continuativo il bilancio del carbonio.

Il bilancio del carbonio dell'ecosistema forestale è la differenza fra la quantità di carbonio che viene assorbita con la fotosintesi e quella che viene restituita con la respirazione: autotrofa, da parte delle piante, ed eterotrofa, da parte dei microrganismi che decompongono la sostanza organica del suolo. Integrando questa differenza nel tempo si ottiene una quantità definita produzione netta ecosistemica (*NEP*);  $NEP > 0$  sta per una foresta che assorbe attivamente carbonio (si dice che è una *sink* di carbonio);  $NEP < 0$  sta per una foresta che rilascia carbonio verso l'atmosfera (si dice che è una *source* di carbonio);  $NEP = 0$  sta per una foresta con bilancio del carbonio in equilibrio, tanto ne viene assorbito con la fotosintesi tanto ne viene restituito con la respirazione.

Il bilancio del carbonio viene elettivamente determinato con un metodo micrometeorologico detto «*eddy covariance*». La definitiva sistemazione della teoria che sta alla base di questo metodo si deve all'opera di uno scienziato inglese, William Christopher (Bill) Swinbank (1913-1973). Interessante figura di ricercatore poliedrico, durante l'ultima guerra mondiale

prestò servizio nella *Royal Air Force*, per poi proseguire la carriera in Australia. Qui si dedicò agli studi di fisica dell'atmosfera e soprattutto alla comprensione dei meccanismi di trasporto «turbolento» negli strati atmosferici di confine con la vegetazione.

Agli inizi degli anni '50 pubblicò il suo lavoro fondamentale (SWINBANK, 1951) in cui enunciò i principi fondamentali del metodo di misura. La teoria era stata sistemata e il metodo delineato, ma Bill Swinbank fu in grado di fare un numero molto limitato di misure, in quanto la tecnologia e la strumentazione dell'epoca ponevano serie limitazioni. Non erano infatti disponibili gli strumenti in grado di misurare, a elevata frequenza, gli scalari atmosferici (concentrazione istantanea dei gas e componente verticale della velocità del vento) che sono richiesti dalla teoria per il calcolo dei flussi di gas fra vegetazione e atmosfera.

La strumentazione idonea (analizzatori di gas a risposta veloce e anemometri sonici, unitamente ad efficaci sistemi d'archiviazione ed elaborazione della gran quantità di dati che vengono prodotti) incominciò a essere disponibile negli anni '80 e fu solo allora che incominciò l'applicazione su vasta scala del metodo che Bill Swinbank aveva definito oltre trent'anni prima. È stato quindi a partire da questo periodo che, applicando il metodo *eddy covariance*, sono iniziati studi sistematici sugli scambi di materia fra foreste e atmosfera; prima, degli scambi d'anidride carbonica, necessari per la definizione del bilancio del carbonio, e di quelli di acqua, in seguito anche di quelli di metano e di altri gas, come i composti organici volatili.

A metà degli anni '90 è stato promosso il progetto europeo Euroflux, confluito poi, all'inizio del nuovo secolo, nel *cluster* di progetti CarboEurope (<http://www.bgc-jena.mpg.de/public/carboeur/>), nell'ambito del quale sono state costituite decine di stazioni permanenti di misura, distribuite in diversi ambienti forestali, dalle foreste boreali a quelle mediterranee, con appendici importanti anche nella foresta amazzonica e nella taiga siberiana. In questa fase un ruolo di rilievo è stato svolto dai gruppi di ricerca italiani; va ricordato, soprattutto, quello guidato all'Università della Tuscia (Viterbo), da Riccardo Valentini, che per anni è stato alla testa del progetto CarboEurope e ha contribuito in modo significativo ai primi passi dell'ecologia globale delle foreste.

Un'analoga rete di misura dei flussi nacque in quegli stessi anni anche negli Stati Uniti e in altri paesi, il che ha poi portato alla costituzione di un coordinamento generale delle reti regionali di misura nell'ambito del progetto Fluxnet, che comprende alcune centinaia di stazioni di misura in tutto il mondo (<http://daac.ornl.gov/FLUXNET/>).

È nata così quella che si può anche definire «ecologia globale del carbonio», i cui principali obiettivi sono quelli di interpretare i meccanismi di

fissazione del carbonio nei principali ecosistemi terrestri, quantificando l'entità dei processi di *sink* e *source* e comprendendo in che modo questi siano modulati dalle condizioni ambientali, dalle anomalie climatiche, dai disturbi, dalla fertilità stagionale e anche dai modi con cui si attua la gestione forestale. Le conoscenze scaturite da questi studi costituiscono una delle basi per la definizione degli accordi internazionali sul clima collegati al protocollo di Kyoto e ai suoi vari sviluppi.

#### FORESTE PRIMARIE: VECCHI PARADIGMI, NUOVE EVIDENZE, RISCHI FUTURI

Per diverso tempo si è pensato che le foreste primarie (spesso impropriamente chiamate foreste «vergini») si trovassero in una condizione in cui i processi di assimilazione sono bilanciati da quelli respiratori, in cui cioè  $NEP = 0$ ; l'assunzione si ricollegava in buona parte all'ipotesi di ODUM (1969) sulle strategie di sviluppo dell'ecosistema.

A metà degli anni novanta, sulla base dei primi risultati delle misure *eddy covariance* nella foresta amazzonica, l'ipotesi dell'equilibrio del bilancio di carbonio incominciò a cedere (GRACE *et al.*, 1995). Un'articolata confutazione è stata prodotta recentemente da LUYSSAERT *et al.* (2008) che hanno dimostrato che anche foreste molto vecchie sono in grado di rimuovere attivamente  $CO_2$  dall'atmosfera, a tassi variabili a seconda delle condizioni climatiche, e quindi continuano a «servire» da *sink* di carbonio, contribuendo per almeno il dieci per cento alla  $NEP$  globale (Fig. 1).

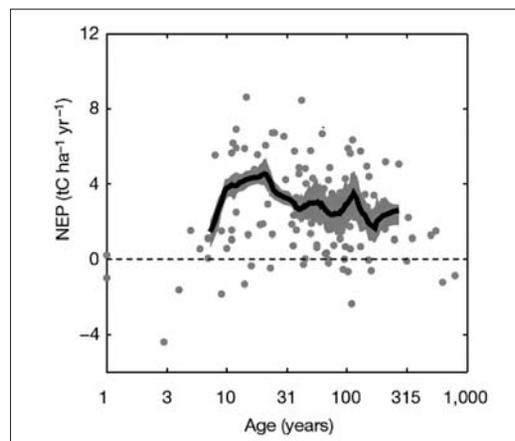


Figura 1 – Produzione netta ecosistemica (NEP) in funzione dell'età della foresta; la linea in grassetto è la media mobile su una finestra di 15 osservazioni; l'area grigia indica l'intervallo di confidenza del 95% (da LUYSSAERT *et al.*, 2008, leggermente modificata). L'asse delle ascisse ha una scala logaritmica.

In un recente lavoro sulla foresta primaria africana, LEWIS *et al.* (2009) hanno stimato, per il periodo 1968-2007, un incremento medio annuo della quantità di carbonio arboreo epigeo pari a 630 kg per ettaro. L'estrapolazione alle restanti componenti della foresta e la combinazione con informazioni disponibili per le altre foreste tropicali, hanno permesso di stimare che, nel complesso, le foreste tropicali assorbono 1,3 miliardi di tonnellate di carbonio all'anno: è una quantità che corrisponde al diciotto per cento di quella che è immessa annualmente in atmosfera per l'uso dei combustibili fossili.

Si conferma così l'idea che le foreste primarie si trovano in una condizione distante dall'ipotetico equilibrio in cui l'assimilazione è bilanciata dalla respirazione. Il motivo di questo scostamento non è chiaro; si può fare l'ipotesi che molte delle foreste tropicali, lungi dall'essere «vergini», stiano in realtà recuperando da precedenti disturbi (tagli, incendi), come sembrano suggerire sia evidenze paleo-ecologiche che archeologiche, e quindi si trovino in una fase successionale intermedia, in cui prevalgono i processi di crescita e accumulo di carbonio (CLARK, 2006, MULLER LANDAU, 2009). Oppure, secondo l'ipotesi di LEWIS *et al.* (2009), che l'attuale fase di crescita sia un transiente positivo legato alle modificazioni ambientali in atto, con particolare riferimento all'aumento della concentrazione atmosferica di anidride carbonica, che agirebbe da fattore fertilizzante.

Oltre alla necessità di interpretare meglio i fenomeni in atto, per poter rappresentare in modo attendibile il funzionamento delle foreste tropicali in rapporto ai futuri livelli di anidride carbonica atmosferica, un punto appare comunque chiaro: ed è che questi ecosistemi, che accumulano e contengono elevatissime quantità di carbonio per unità di superficie, esposti agli attuali agenti di distruzione, da *sink* che sono potrebbero trasformarsi in potenti *source*, cioè in vere e proprie «bombe di carbonio», rilasciandone in atmosfera grandi quantità.

Si tratta di risultati che aprono fronti importanti sul piano della politica ambientale in rapporto alla necessità di proteggere questi sistemi, che non sono a tutt'oggi tutelati da specifici accordi internazionali. Nel caso delle foreste primarie tropicali l'indirizzo è tanto difficile da attuare quanto obbligatorio, data la drammaticità dell'erosione che stanno subendo. Uno snodo importante sarà rappresentato dalla discussione dello schema REDD (*Reducing emissions from deforestation in developing countries*), che dovrebbe trovare uno sviluppo alla prossima conferenza di Copenhagen sul clima, nel dicembre 2009. Uno dei punti caldi della discussione riguarderà la richiesta di paesi ad economia in crescita (Cina ed India) di compensare la deforestazione con nuove piantagioni. In un recente articolo (PIAO *et al.*, 2009) viene documentato per la Cina un assorbimento annuo di 190-260

milioni di tonnellate di carbonio, pari a circa il 30% delle emissioni da combustibili fossili dell'intero paese; l'assorbimento viene attribuito all'esecuzione su larga scala di piantagioni nel settore meridionale del paese, oltre che a processi naturali di rivegetazione.

#### IL RUOLO DELLA RESPIRAZIONE NEL BILANCIO DEL CARBONIO

Uno dei primi risultati scaturiti dalle misure *eddy covariance* nelle foreste europee ha riguardato l'individuazione della respirazione ecosistemica come componente importante del bilancio del carbonio (VALENTINI *et al.* 2000) (Fig. 2). In particolare, la respirazione del suolo, in cui confluiscono sia la respirazione delle radici e delle micorrize (autotrofa) sia la decomposizione della sostanza organica del suolo e della lettiera (eterotrofa), contribuisce fino al 60-80% del bilancio del carbonio e determina in misura elevata la sua variabilità interannuale, soprattutto in ambiente mediterraneo.

Anche le modalità di gestione del bosco possono influenzare la respirazione del suolo; per boschi cedui dell'ambiente mediterraneo è stato visto che la respirazione del suolo (e anche la sua dipendenza dalla temperatura) tende a diminuire con l'età del soprassuolo per cui, modificando la distribuzione delle classi di età della foresta attraverso opportune scelte di pianificazione forestale, si potrebbe influenzare il bilancio del carbonio della foresta nel suo complesso (TEDESCHI *et al.*, 2006).

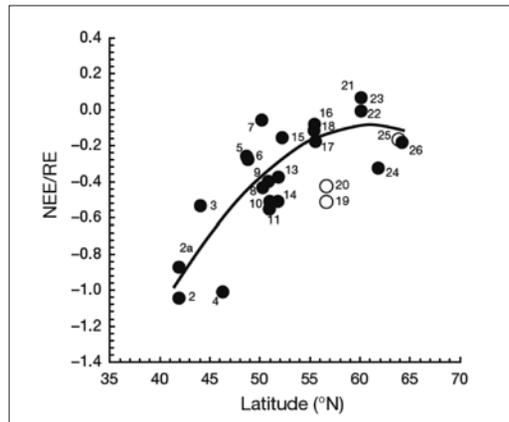


Figura 2 – Relazione fra la latitudine e il rapporto fra lo scambio ecosistemico netto (NEE, bilancio di breve periodo fra assimilazione e respirazione, valori negativi indicano assorbimento netto di carbonio in questo caso) e la respirazione ecosistemica totale (RE). I cerchietti neri indicano foreste naturali o semi-naturali, i cerchietti chiari piantagioni. RE tende ad aumentare con la latitudine (da VALENTINI *et al.*, 2000). I numeri indicano i diversi siti di misura *eddy covariance* del progetto Euroflux, vedi lavoro originale.

La respirazione del suolo appare uno degli aspetti critici nel quadro del bilancio del carbonio della biosfera: sia per il grado di incertezza con cui viene rappresentata in rapporto alle variabili che la possono influenzare alle diverse scale temporali, sia per le grandi quantità di carbonio coinvolte, che potrebbero trasformare gli *stock* del suolo in una pericolosa «bomba ad orologia». Uno dei casi critici è quello costituito dall'enorme quantità di carbonio (oltre quattrocento miliardi di tonnellate) stoccato nelle zone dove il suolo è perennemente gelato (*permafrost*): il progressivo scongelamento dovuto al riscaldamento climatico potrebbe innescare un circolo vizioso fra aumento della temperatura e tasso di decomposizione, in grado a sua volta di provocare un innalzamento termico, con il risultato netto di una consistente restituzione di carbonio in atmosfera (ZIMOV *et al.*, 2006).

#### L'IMPATTO DEGLI ESTREMI CLIMATICI E DEI DISTURBI AMBIENTALI: LA VULNERABILITÀ DEL *SINK* TERRESTRE

Le reti di misura del bilancio del carbonio stanno mettendo in evidenza che gli scambi di anidride carbonica fra foreste e atmosfera sono soggetti a una forte variabilità interannuale, la cui comprensione funzionale resta ancora incompleta.

L'ipotesi che particolari anomalie climatiche possano compromettere la funzione di *sink* delle foreste ha trovato conferma da misure di flusso, e successive modellazioni, eseguite nel corso dell'ondata di calore che, nell'estate del 2003, ha interessato l'Europa centrale e occidentale (CIAIS *et al.*, 2005). In questo lavoro si dimostra che nel 2003 le foreste europee si sono trasformate da *sink* a *source* e che la restituzione di carbonio del 2003 ha consumato i quattro anni precedenti di attività della foresta come *sink*. È di poche settimane orsono un altro lavoro (PHILLIPS *et al.*, 2009) in cui si stima che nella foresta amazzonica l'annata siccitosa del 2005 abbia provocato una perdita totale di carbonio variabile fra 1,2 e 1,6 miliardi di tonnellate.

Le foreste, al pari degli altri ecosistemi terrestri, non rispondono a ipotetiche condizioni climatiche «medie» ma a una concreta e reale sequenza di condizioni atmosferiche. Si pone dunque il punto della comprensione funzionale e della rappresentazione efficace degli effetti di eventi «estremi», che possono essere la conseguenza dell'aumento dell'effetto serra, e che potrebbero «spegnere» il contributo positivo delle foreste, con un effetto di rinforzo del riscaldamento climatico.

Un caso interessante, a proposito dei disturbi ambientali, è anche quello degli uragani. LINDROTH *et al.* (2008) hanno messo in evidenza che una singola tempesta (l'uragano *Gudrun* che ha colpito la Svezia nel gennaio del 2005) può determinare grandi riduzioni del potere di *sink* della foresta: nel caso specifico

una riduzione pari a oltre tre milioni di tonnellate di carbonio nel primo anno dopo il passaggio dell'uragano; i medesimi autori stimano che il catastrofico uragano *Lothar*, del dicembre 1999, abbia determinato una riduzione del bilancio di carbonio delle foreste europee di 16 milioni di tonnellate di carbonio, pari al trenta per cento della produzione netta totale.

Analogo discorso può essere fatto per gli effetti delle epidemie di insetti (KURZ *et al.*, 2008) e per tutte le variazioni climatiche che innescano combinazioni atmosferiche (temperatura e umidità dell'aria, stato idrico della vegetazione, velocità del vento, ecc.) in grado di modificare la frequenza e l'intensità degli incendi, altro rilevante fattore di restituzione di carbonio in atmosfera.

Si tratta di aspetti che ancora non vengono rappresentati in modo soddisfacente nei modelli di circolazione generale. Sia per il livello di dettaglio che può essere incorporato in questi modelli, sia per oggettive carenze di tipo interpretativo.

Anche gli estremi idrici, possibile conseguenza di cambiamenti del regime delle precipitazioni, trovano non semplice rappresentazione e parametrizzazione nei modelli, dal momento che l'effetto può dipendere molto dalla capacità di trattenuta idrica dei suoli, fortemente variabile su base spaziale, dalla modalità con cui il carbonio si distribuisce lungo il profilo del suolo, pure soggetta ad ampia variazione, dalla specifica risposta allo stress idrico delle singole specie; risposta che, nel caso delle foreste, può coinvolgere anche processi di acclimatazione strutturale nel medio-lungo periodo. La rappresentazione è complicata dalle retroazioni che si possono sviluppare a scala di sistema; ad esempio, la maggior produzione di radici fini, attesa in condizioni di stress idrico (MAGNANI *et al.*, 2002), potrebbe tradursi in un apporto di carbonio «fresco» al suolo capace di innescare un effetto di *priming* microbiologico (*sensu* FONTAINE *et al.*, 2004), in grado di stimolare la respirazione del suolo e la restituzione di carbonio.

Aspetto da evidenziare, sul piano delle politiche ambientali, è che l'indebolimento del *sink* terrestre, cioè la possibilità che la biosfera terrestre non continui ad assorbire carbonio ai tassi attuali, non è evenienza per ora considerata negli scenari «ufficiali» di contenimento dell'effetto serra e del riscaldamento climatico.

#### LE DIVERSE FACCE DEL CAMBIAMENTO GLOBALE

È sempre più chiaro che il cambiamento globale è un processo multifattoriale e che fra i diversi fattori si possono sviluppare interazioni in grado di determinare effetti sia di amplificazione che di compensazione.

Una delle ultime evidenze: la presenza in atmosfera di aerosol inquinanti (ad esempio, biossido di zolfo derivante da emissioni antropogeniche e da eruzioni vulcaniche) determina il prevalere di condizioni di luce diffusa che favoriscono l'assimilazione del carbonio, rispetto a condizioni di radiazione diretta più tipiche di un'atmosfera «pulita» (MERCADO, 2009); il che suggerirebbe un effetto di «fertilizzazione» del *sink* terrestre da parte del biossido di zolfo presente in atmosfera.

Un'altra importante interazione è quella che si sviluppa fra il ciclo del carbonio e quello dell'azoto. L'azoto è un elemento chiave della produttività vegetale, di grande importanza nel modulare la risposta degli ecosistemi all'aumento della concentrazione atmosferica di anidride carbonica (REICH *et al.*, 2006). Le deposizioni azotate, causate dall'immissione in atmosfera, da parte dell'uomo, di grandi quantità di azoto reattivo – centocinquanta milioni di tonnellate all'anno, di cui diciotto milioni ricadono sulle foreste – sono una componente molto rilevante del cambiamento globale (GRUBER e GALLOWAY, 2008; SCHLESINGER, 2009).

Fino a un paio di anni fa non c'era però dimostrazione che le deposizioni azotate potessero avere un effetto significativo sul bilancio di carbonio degli ecosistemi forestali; si riteneva anzi che tale effetto fosse di poco conto (NADELHOFER *et al.* 1999). La tematica ha subito una svolta due anni fa quando, elaborando in modo originale i dati di flusso della rete CarboEuroflux e incrociando i risultati di queste analisi con i tassi di deposizione azotata (HOLLAND *et al.*, 2005), MAGNANI *et al.* (2007) hanno osservato una chiara relazione fra produttività netta ecosistemica (NEP) e deposizioni azotate (Fig. 3).

Il risultato ha suscitato notevole discussione (HÖGBERG, 2007, DE VRIES *et al.*, 2008, MAGNANI *et al.*, 2008), anche per la rilevanza che il fenomeno potrebbe rivestire per le politiche ambientali, ed è opportuno riconoscere che sussistono tuttora incertezze sia sull'intensità della relazione sia sui meccanismi funzionali che la determinerebbero.

Il ruolo dell'azoto appare rilevante anche sulla scorta di un recente lavoro di OLLINGER *et al.* (2008), che hanno reso nota una stretta relazione fra la concentrazione di azoto nelle chiome degli alberi e l'albedo della foresta, data dal rapporto fra la radiazione solare incidente e quella riflessa della copertura forestale (Fig. 4).

L'albedo è una componente importante del bilancio radiativo terrestre e quindi il risultato, se confermato, assumerebbe notevole significato in rapporto ai meccanismi di regolazione climatica; suggerendo l'idea che l'azoto possa rappresentare, attraverso la sua influenza sulla riflettività e sul bilancio energetico superficiale, un fattore di regolazione del sistema climatico globale.

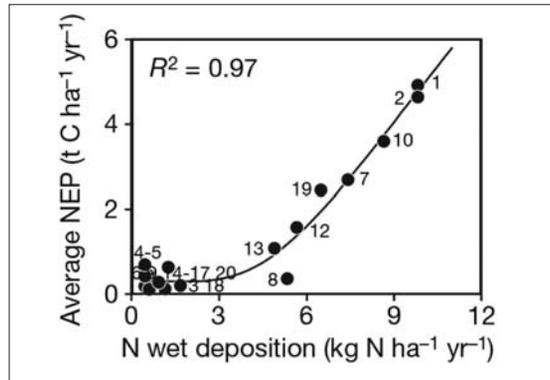


Figura 3 – Relazione fra deposizioni azotate e produzione netta ecosistemica (NEP, mediata in questo caso sulle classi di età della foresta) in foreste della zona temperata e boreale (da MAGNANI *et al.*, 2007). I numeri fanno riferimento ai diversi ecosistemi forestali considerati, vedi lavoro originale.

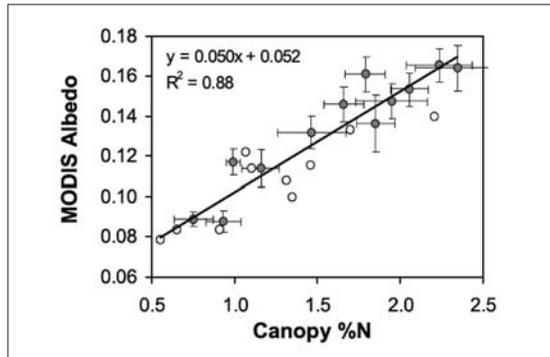


Figura 4 – Relazione fra la concentrazione di azoto nella chioma della foresta e l'albedo superficiale (*total shortwave*) misurato dal sensore satellitare MODIS (da OLLINGER *et al.*, 2008).

#### LA GESTIONE DELLE FORESTE E UN FENOMENO CONTROINTUITIVO: IL CARBON LEAKAGE

Tutti concordano sul fatto che le foreste debbano essere protette dallo sfruttamento indiscriminato (il caso delle foreste tropicali è eclatante) e che la gestione forestale debba rendere compatibile l'uso della foresta con il mantenimento della sua funzionalità; in accordo con i principi di quella gestione forestale sostenibile che ha consentito alle foreste europee di raggiungere una consistenza e una capacità d'accumulo del carbonio inimmaginabile solo mezzo secolo fa (CIAIS *et al.*, 2008).

I livelli di protezione della foresta devono però essere valutati non solo in rapporto alle foreste che si gestiscono direttamente ma anche ai pos-

sibili effetti che si verificano lontano. Con attenzione a un fenomeno, detto *carbon leakage*, che è la conseguenza, involontaria ma negativa, della gestione del carbonio in una zona sul carbonio accumulato in un'altra zona. Per intendersi, il beneficio sull'accumulo di carbonio in una certa regione forestale, derivante da una gestione che qui riduce il prelievo di legname, può tradursi, se resta costante o cresce la richiesta di legno, in un maggior prelievo in un'altra regione; se in questa seconda regione le foreste sono intrinsecamente più vulnerabili in relazione ai processi di assorbimento e di restituzione del carbonio, l'effetto netto sul carbonio complessivamente accumulato può essere negativo.

È di pochi mesi fa un lavoro (MAGNANI *et al.*, 2009) in cui viene messo in evidenza che la relazione fra il livello di protezione delle foreste delle zone temperate e l'accumulo di carbonio a scala globale assomiglia a una parabola lungo la quale, superato un certo livello di protezione della foresta, l'accumulo di carbonio complessivo bruscamente crolla (Fig. 5).

In altre parole, se conserviamo i nostri boschi ma per procurarci il legname di cui abbiamo bisogno (magari per costruire i mobili d'autore che ogni anno attirano centinaia di migliaia di visitatori al salone di Milano) andiamo a tagliare i boschi siberiani o la foresta tropicale, a scala globale l'effetto sul carbonio può essere fortemente negativo.

Dove sta lo snodo critico? Sta nel fatto che i benefici delle scelte di protezione, soprattutto in termini d'immagine presso l'opinione pubblica, sono vicini e visibili, e quindi graditi ai politici, mentre gli effetti negativi

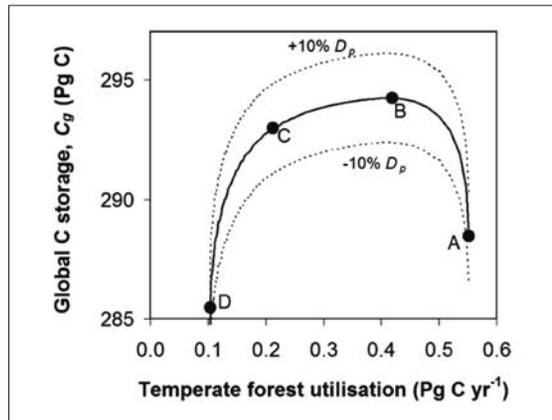


Figura 5 – Esempificazione teorica del fenomeno *carbon leakage*. Sulle ascisse il tasso di utilizzazione delle foreste temperate (inversamente proporzionale al loro livello di protezione). Quando si supera il livello di protezione corrispondente al punto B sulla curva in neretto, la quantità di carbonio accumulata a scala globale incomincia a declinare. Le curve tratteggiate fanno riferimento a simulazioni in cui viene variato (del 10%) il ciclo di vita dei prodotti legnosi che si estraggono dalla foresta; 1 Pg C = un miliardo di tonnellate di carbonio (da MAGNANI *et al.*, 2009).

sono remoti o, comunque, si diluiscono a scala globale, e quindi tanta preoccupazione non destano. Discende, da ciò, il richiamo a una valutazione non solo locale ma complessiva delle politiche di gestione forestale.

#### QUALCHE CONSIDERAZIONE FINALE

*The clearest way into the universe is through a forest wilderness.* Questa frase di John Muir si presta a una libera parafrasi: attraverso la foresta passa buona parte della strada che dobbiamo fare verso la comprensione di come funziona l'ambiente globale e verso la sua conservazione.

Se è vero che questa strada oggi la possiamo percorrere ricchi delle notevoli conoscenze derivanti dagli studi compiuti negli ultimi anni, dobbiamo però riconoscere che permangono tuttora numerose incertezze interpretative a proposito delle interazioni fra biosfera e atmosfera e del ruolo delle foreste nella mitigazione dell'effetto serra; ciò vale per l'ambiente di oggi ma ancor più per le previsioni che si cerca di fare per l'ambiente di domani.

Ho cercato di evidenziare che alcune di queste incertezze sono legate all'imperfezione con cui sono rappresentate le interazioni fra i diversi fattori del cambiamento globale e fra i diversi processi che hanno luogo nell'ecosistema forestale; ad esempio, le relazioni fra il ciclo dell'azoto, così fortemente perturbato dalle attività antropiche, e quello del carbonio. Le cose si complicano se la prospettiva è poi quella di medio-lungo periodo, che richiede necessariamente una valutazione dei possibili fenomeni di acclimatazione, come quello consistente in una diversa distribuzione del carbonio nell'ecosistema, che potrebbe modulare in modo importante la risposta del sistema all'aumento della disponibilità di azoto.

È a causa di queste imperfezioni interpretative che i modelli di circolazione generale ancora si fondano su formalizzazioni approssimate degli scambi di carbonio, in particolare su cinetiche di assorbimento fotosintetico e restituzione respiratoria essenzialmente slegate fra loro e poco interagenti con le altre componenti ambientali (HEIMANN e REICHSTEIN, 2008).

Esistono quindi ancora molti dubbi su quello che sarà il ruolo della biosfera nell'assorbimento del carbonio e nella mitigazione dell'effetto serra. Dopo la fase importante rappresentata dalle reti di misura del bilancio del carbonio a scala di foresta, ulteriori passi in avanti sembrano legati alla possibilità di organizzare ricerche multi-scala e multi-temporali: dall'indagine mirata su singoli processi chiave a manipolazioni multi-fattoriali a scala ecosistemica, anche di medio-lungo periodo; l'attesa è che da ciò scaturisca la possibilità di integrare in modo funzionalmente «solido» i modelli

esistenti (il tentativo di passare da modelli «solo carbonio» a modelli «carbonio & azoto» è già in corso). Anche la possibilità di misurare da remoto, in continuo e a medio-alta risoluzione il bilancio del carbonio della biosfera, non appare una «chimera» sul piano tecnologico e potrà fornire uno strumento di grande efficacia sotto l'aspetto interpretativo e predittivo.

## SUMMARY

### The global ecology of forests

It is shown that research on the forest carbon balance performed in the last two decades has allowed: the identification of forest ecosystems, including primary forests, as important carbon sinks; the assessment of ecosystem respiration as the main determinant of ecosystem carbon balance; the evaluation of the interannual variability of carbon exchange and its regulation by environmental conditions; the assessment of the vulnerability of some ecosystem components, like soils, that could release to the atmosphere part of the huge amount of carbon that has accumulated over millennia. It is shown, on the other hand, that several aspects of ecosystem functioning and the interaction between global change components (for instance, the relationship between carbon and nitrogen cycles) call for a better interpretation, and that general circulation models do not represent in a satisfactory way several processes that could be important in determining the exchange of matter and energy between the biosphere and the atmosphere. For these reasons the future role of forests and the biosphere in the mitigation of greenhouse effect and climate change is still an open question.

## BIBLIOGRAFIA

- BONAN G.B., 2008 – *Forests and Climate Change: Forcings, Feedbacks and the Climate Benefits of Forests*. Science, 320: 1440-1449.
- CIAIS P., REICHSTEIN M., VIOVY N. *et al.*, 2005 – *Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003*. Nature, 437: 529-533.
- CIAIS P., SCHELHAAS M.J., ZAEHLE S. *et al.*, 2008 – *Carbon accumulation in European forests*. Nature Geoscience, 1: 425-429.
- CLARK D., 2006 – *Detecting tropical forests' responses to global climatic and atmospheric change: current challenges and a way forward*. Biotropica, 39: 4-19.
- DE VRIES W., SOLBERG S., DOBBERTIN M., 2008 – *Ecologically implausible carbon response?* Nature, 451, E3-E4. doi: 10.1038/nature06580.
- FONTAINE S., BARDOUX G., ABBADIE L., MARIOTTI A., 2004 – *Carbon input to soil may decrease soil carbon content*. Ecology Letters, 7: 314-320.
- GRACE J., LLOYD J., MCINTYRE J. *et al.*, 1995 – *Carbon dioxide uptake by an undisturbed tropical rain forest in Southwest Amazonia, 1992 to 1993*. Science, 270: 778-780.
- GRUBER N., GALLOWAY J., 2008 – *An Earth-system perspective of the global nitrogen cycle*. Nature, 451: 293-296.

- HEIMANN M., REICHSTEIN M., 2008 – *Terrestrial ecosystem carbon dynamics and climate feedbacks*. *Nature*, 451: 289-292.
- HÖGBERG P., 2007 – *Environmental science: Nitrogen impacts on forest carbon*. *Nature*, 447: 781-782.
- HOLLAND E.A., BRASWELL B.H., SULZMAN J., LAMARQUE J.F., 2005 – *Nitrogen deposition onto the United States and Western Europe: Synthesis of observations and models*. *Ecological Applications*, 15: 38-57.
- KURZ W.A., DYMOND C.C., STINSON G., RAMPLEY G.J., NEILSON E.T., CARROLL A.L., EBATA T., SAFRANYIK L., 2008 – *Mountain pine beetle and forest carbon feedback to climate change*. *Nature*: 987-990.
- LEWIS S.L., LOPEZ-GONZALEZ G., SONKÉ B. *et al.*, 2009 – *Increasing carbon storage in intact African tropical forests*. *Nature*, 457: 1003-1006.
- LUYSSAERT S., SCHULZE E.-D., BORNER A. *et al.*, 2008 – *Old-growth forests as global carbon sinks*. *Nature*, 455: 213-215.
- MAGNANI F., DEWAR R.C., BORGHETTI M., 2009 – *Leakage and spillover effects of forest management on carbon storage: theoretical insights from a simple model*. *Tellus Series B: Chemical and Physical Meteorology*, 61B: 385-393.
- MAGNANI F., GRACE J., BORGHETTI M., 2002 – *Adjustment of tree structure in response to the environment under hydraulic constraints*. *Functional Ecology*, 16: 385-393.
- MAGNANI F., MENCUCCINI M., BORGHETTI M. *et al.*, 2008 – *Magnani et al. Reply*. *Nature*, 451, E3-E4. doi:10.1038/nature06580.
- MAGNANI F., MENCUCCINI M., BORGHETTI M. *et al.*, 2007 – *The human footprint in the carbon cycle of temperate and boreal forests*. *Nature*, 447: 849-851.
- MERCADO L.M., BELLOUIN N., SITCH S., BOUCHER O., HUNTINGFORD C., WILD M., COX P.M., 2009 – *Impact of changes in diffuse radiation on the global land carbon sink*. *Nature*, 458: 1014-1017.
- MULLER-LANDAU H.C., 2009 – *Carbon cycle: Sink in the African jungle*. *Nature*, 457: 969-970.
- NADELHOFFER K.J., EMMETT B.A., GUNDERSEN P., KJØNAAS O.J., KOOPMANS C.J., SCHLEPPI P., TIETEMA A., WRIGHT R.F., 1999 – *Nitrogen deposition makes a minor contribution to carbon sequestration in temperate forests*. *Nature*, 398: 145-148.
- ODUM E.P., 1969 – *The strategy of ecosystem development*. *Science*, 164: 262-270.
- OLLINGER S.V., RICHARDSON A.D., MARTIN M.E. *et al.*, 2008 – *Canopy nitrogen, carbon assimilation, and albedo in temperate and boreal forests: Functional relations and potential climate feedbacks*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105: 19335-19340.
- PHILLIPS O.L., ARAGÃO LUIZ E.O.C., LEWIS S.L. *et al.*, 2009 – *Drought Sensitivity of the Amazon Rainforest*. *Science*, 323: 1344-1347.
- PIAO S., FANG J., CIAIS P., PEYLIN P., HUANG Y., SITCH S., WANG T., 2009 – *The carbon balance of terrestrial ecosystems in China*. *Nature*, 458: 1009-1013.
- REICH P.B., HOBBIIE S.E., LEE T., ELLSWORTH D.S., WEST J.B., TILMAN D., KNOPS

- J.M.H., NAEEM S., TROST J., 2006 – *Nitrogen limitation constrains sustainability of ecosystem response to CO<sub>2</sub>*. *Nature*, 440: 922-925.
- SCHLESINGER W.H., 2009 – *On the fate of anthropogenic nitrogen*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106: 203-208.
- SWINBANK W.C., 1951 – *The measurement of vertical transfer of heat and water vapor by eddies in the lower atmosphere*. *Journal of Meteorology*, 8: 135-145.
- TEDESCHI V., REY A., MANCA G., VALENTINI R., JARVIS P.G., BORGHETTI M., 2006 – *Soil respiration in a Mediterranean oak forest at different developmental stages after coppicing*. *Global Change Biology*, 12: 110-121.
- VALENTINI R., MATTEUCCI G., DOLMAN A.J. *et al.*, 2000 – *Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests*. *Nature*, 404: 861-865.
- ZIMOV S.A., SCHUUR E.A.G., CHAPIN III F.S., 2006 – *Climate warming will thaw permafrost, releasing trapped carbon from this high-latitude reservoir and further exacerbating global warming*. *Science*, 5780: 1612-1613.