



**APAT**

Agenzia per la protezione  
dell'ambiente e per i servizi tecnici

# **Le relazioni tra cambiamenti del clima ed ecosistemi vegetali**

### **Informazioni legali**

L'Agenzia per la protezione dell'ambiente e per i servizi tecnici o le persone che agiscono per conto dell'Agenzia stessa non sono responsabili per l'uso che può essere fatto delle informazioni contenute in questo rapporto.

### **APAT**

Agenzia per la protezione dell'ambiente e per i servizi tecnici  
Dipartimento Difesa della Natura, Servizio Parchi, Ecosistemi e Biodiversità  
Via Vitaliano Brancati, 48 - 00144 Roma

© APAT, Rapporti 32/2003

ISBN 88-448-0099-3

Riproduzione autorizzata citando la fonte

### **Elaborazione grafica**

APAT

Foto di copertina: Paolo Orlandi

### **Impaginazione e stampa**

I.G.E.R. srl - Viale C. T. Odiscalchi, 67/A - 00147 Roma

Stampato su carta TFC

Finito di stampare marzo 2004

**Autori:**

Lorenzo Ciccarese - APAT

Alessandra Fino - APAT, collaboratrice APAT di tipo coordinata e continuativa

Si ringrazia Claudia Dolci, dottore forestale, per aver redatto il capitolo 4.1.1



## Prefazione

Le condizioni climatiche determinano le specie vegetali e animali che possono vivere, crescere e riprodursi in una determinata regione geografica. Alcune specie sono talmente legate alle condizioni climatiche a cui si sono adattate che un leggero aumento della temperatura o una piccola riduzione delle piogge possono aumentare la loro vulnerabilità. A causa dei cambiamenti climatici globali, ci dobbiamo quindi aspettare che le specie vegetali migrino dalle loro abituali zone climatiche? Come cambieranno gli ecosistemi e il paesaggio?

Ma ci sono altri quesiti, non meno rilevanti. Nel corso degli ultimi 150 anni, la concentrazione d'anidride carbonica in atmosfera è aumentata del 32%, passando da 280 a 370 parti per milione in volume. Come è noto a molti, la concentrazione atmosferica di questo gas ha un effetto sulle piante, agendo direttamente sulla fotosintesi clorofilliana, il processo attraverso il quale le piante usano l'anidride carbonica per creare nuovo materiale biologico. Maggiori concentrazioni d'anidride carbonica dovrebbero favorire la produttività delle piante, ammesso che gli altri fattori di crescita, quali acqua ed elementi nutritivi, siano disponibili a sufficienza. Tuttavia, gli studi svolti su questi temi sono giunti a risultati contrastanti. Quale sarà l'effetto di questa variazione su scala globale? Come varierà la produttività degli ecosistemi agricoli e vegetali alle nostre latitudini?

Infine, vi è un aspetto delle relazioni tra cambiamenti climatici ed ecosistemi vegetali, legato alla capacità delle piante di assorbire anidride carbonica (sottraendola all'atmosfera) e fissarla, per periodi più o meno lunghi, nelle diverse componenti che costituiscono un ecosistema vegetale.

Questa funzione di mitigazione dell'effetto serra da parte degli ecosistemi agricoli e forestali è stata riconosciuta anche Protocollo di Kyoto, l'ormai rinomato accordo internazionale che mira alla riduzione della concentrazione dei gas-serra. Qual è il contributo che le foreste e i sistemi agricoli possono dare nelle strategie internazionale e nazionali di mitigazione dell'effetto serra?

Con la pubblicazione del presente rapporto, è nostra intenzione fornire al pubblico e ai decisori politici alcune indicazioni di sintesi su questo tema complesso, offrendo i risultati raggiunti dalla comunità scientifica internazionale, ma anche informazioni sulle iniziative che a livello internazionale si stanno svolgendo per mitigare i cambiamenti del clima.

Dr.ssa Marisa Amadei  
Dipartimento Difesa della Natura



# Indice generale

	<b>SOMMARIO</b>	<b>1</b>
<hr/>		
<b>1.</b>	<b>INTRODUZIONE</b>	<b>3</b>
1.1	I cambiamenti climatici e le cause	4
1.2	Il panorama internazionale: il ruolo dell' <i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> (IPCC)	4
<hr/>		
<b>2.</b>	<b>IL CLIMA E LE SUE COMPONENTI</b>	<b>7</b>
2.1	Le variazioni naturali	7
2.2	Le variazioni climatiche indotte dall'uomo	9
2.3	I cambiamenti climatici osservati su scala globale	11
<hr/>		
<b>3.</b>	<b>GLI EFFETTI DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI GLOBALI SUGLI ECOSISTEMI VEGETALI</b>	<b>13</b>
3.1	L'agricoltura	15
3.1.1	La risposta delle piante all'aumento della concentrazione di CO <sub>2</sub>	16
3.1.2	Gli effetti combinati dell'aumento della temperatura e della CO <sub>2</sub>	17
3.1.3	Gli effetti combinati della disponibilità idrica e della CO <sub>2</sub>	17
3.2	Le foreste	18
3.2.1	Le foreste e i cambiamenti climatici	20
3.2.2	Gli impatti dei cambiamenti climatici sui differenti ecosistemi forestali	21
<hr/>		
<b>4.</b>	<b>IL RUOLO DEGLI ECOSISTEMI AGRO-FORESTALI NELLA MITIGAZIONE DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI</b>	<b>23</b>
4.1	Il ruolo delle foreste	23
4.1.1	Strategie di mitigazione	24
4.2	Il ruolo dei suoli agricoli	28
<hr/>		
<b>5.</b>	<b>LE DECISIONI DELLA UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (UNFCCC)</b>	<b>31</b>
<hr/>		
<b>6.</b>	<b>I CAMBIAMENTI CLIMATICI OSSERVATI IN EUROPA</b>	<b>31</b>
6.1	La temperatura	35
6.2	Le precipitazioni e gli eventi estremi	36
<hr/>		
<b>7.</b>	<b>GLI EFFETTI DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI NEL MEDITERRANEO</b>	<b>39</b>
7.1	Il settore agricolo	39
7.2	Il settore forestale	39
7.2.1	Le risorse forestali in Europa	40
7.2.2	Effetti sulla foresta mediterranea	41
<hr/>		
<b>8.</b>	<b>CONCLUSIONI</b>	<b>43</b>
<hr/>		
<b>9.</b>	<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>45</b>



## Sommario

La natura e l'intensità di alcune attività antropiche e, in particolare, di quelle legate ai processi energetici, all'uso del suolo e alle sue variazioni, si sono notevolmente modificate nel corso degli ultimi decenni. Queste attività hanno avuto e continuano ad avere un'interferenza sul ciclo naturale dei gas responsabili dell'effetto serra, quali anidride carbonica (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), ossido di carbonio (CO), protossido d'azoto (N<sub>2</sub>O), biossido di zolfo (SO<sub>2</sub>) ozono (O<sub>3</sub>) e cloroflocarburi (CFC).

Gran parte della comunità scientifica internazionale riconosce che proprio il progressivo aumento delle emissioni di gas serra siano i principali responsabili d'un altro dato ormai scientificamente confermato: la crescita tendenziale della temperatura media della superficie terrestre e i cambiamenti d'altri fattori che descrivono il clima.

Tuttavia, gli esperti, pur esprimendo forti preoccupazioni sui potenziali impatti di tali cambiamenti sulla salute umana, l'agricoltura, le risorse idriche, le foreste, la biodiversità animale e vegetale, le aree costiere, riconoscono ampi spazi di indeterminazione. Specialmente per quelli riguardanti gli impatti sugli ecosistemi vegetali.

Un aumento della produttività degli ecosistemi vegetali come risposta all'aumento della concentrazione dell'anidride carbonica ('fertilizzazione carbonica') e della temperatura è stato osservato su diverse specie, ecosistemi e regioni bioclimatiche, anche se nel breve periodo (e quasi sempre) in esperimenti su piante giovani; se questo aumento nella produttività delle piante possa continuare nel tempo è un aspetto che rimane ancora dubbio; infatti, qualche ricerca indica che spesso questo effetto stimolante della CO<sub>2</sub> sulla crescita possa attenuarsi dopo i primi anni di vita delle piante. E non mancano, viceversa, gli studi che indicano effetti negativi: alcune specie, quali i salici, reagirebbero negativamente all'aumento della CO<sub>2</sub>. In conseguenza di questa diversa risposta da specie a specie, è facile attendersi una modificazione della competizione tra le specie con l'aumento della CO<sub>2</sub> nell'atmosfera.

Su scala globale, la fertilizzazione carbonica, l'aumento della temperatura e le condizioni climatiche più favorevoli produrranno sicuramente effetti positivi sugli ecosistemi vegetali delle regioni boreali, dove si allungherà la stagione vegetativa e il terreno metterà a disposizione una maggiore quantità di nutrienti derivanti dalla decomposizione della sostanza organica. Effetti negativi invece si prevedono per le regioni tropicali e sub-tropicali, e le regioni a clima arido e sub-arido, dove la produttività e l'estensione della vegetazione si ridurranno notevolmente a causa dell'aumento della temperatura e della riduzione delle precipitazioni. Questi impatti riguardano anzitutto l'aumento della produttività degli ecosistemi vegetali per effetto della 'fertilizzazione carbonica' dovuta all'aumento della concentrazione di CO<sub>2</sub>.

I rischi di quest'ultimi impatti sulla produttività dei sistemi agricoli e forestali italiani richiedono, nel breve periodo, l'adozione di strategie di mitigazione, che dovranno riguardare, limitatamente al settore agricolo, alcune pratiche agronomiche (uso di nuove varietà, di varietà locali, spostamento delle date di semina e raccolta), l'uso più razionale di fertilizzanti, pesticidi, regolatori della crescita, l'introduzione di nuovi sistemi di gestione delle risorse idriche. Ma per un adattamento nel lungo periodo a queste variazioni, è necessaria una gestione diversa che comporti dei cambiamenti d'uso del suolo per ottimizzare o stabilizzare le produzioni agricole, la sostituzione di colture, la modificazione delle condizioni micro-climatiche, l'uso di sistemi d'irrigazione più efficienti e la trasformazione, in genere, della gestione del settore agricolo (agro-selvicoltura e sistemi agricoli misti invece che specializzati).

Ma le relazioni tra gli ecosistemi vegetali e i cambiamenti climatici non si esauriscono qui. Le piante, attraverso la regolazione dei cicli biologici connessi al ciclo del carbonio, scambiano grandi quantità di CO<sub>2</sub> con l'atmosfera. Le piante, infatti, assorbono CO<sub>2</sub> dall'atmosfera grazie alla fotosintesi, per costruire zuccheri e altri composti organici, utili per la crescita e il me-

tabolismo. Gli alberi, in particolare, immagazzinano il carbonio nel legno e altri tessuti fino a quando non muoiono e si decompongono, momento in cui il carbonio è rilasciato nell'atmosfera sotto forma di CO<sub>2</sub> e altri gas di carbonio, oppure è incorporato nel suolo sotto forma di sostanza organica, per periodi più o meno lunghi, prima di essere restituito all'atmosfera. Questa funzione fissativa della CO<sub>2</sub> – e di abbattimento delle sue concentrazioni nell'atmosfera — da parte degli ecosistemi vegetali è stata riconosciuta dagli accordi internazionali per mitigare l'effetto serra e, segnatamente, dal Protocollo di Kyoto come un valido strumento di mitigazione dei cambiamenti climatici.

Per quel che riguarda le foreste, le opzioni che esse offrono nelle politiche di controllo e mitigazione dei cambiamenti climatici si basano sull'espansione della superficie forestale globale mediante la realizzazione di nuove piantagioni, di conservazione delle foreste esistenti e, più in generale, di controllo delle dinamiche di cambiamenti d'uso del suolo come strumento di contenimento delle concentrazioni di gas-serra nell'atmosfera. Il potenziale contributo delle foreste alla mitigazione dei cambiamenti climatici è in funzione di una serie di variabili che è difficile prevedere. Alcuni studi di recente pubblicazione affermano che le foreste possono "sequestrare", su scala globale, 1-1,5 miliardi di tonnellate di carbonio l'anno. Ma questo contributo potrebbe essere anche maggiore se si venisse considerato anche l'apporto energetico delle biomasse legnose in sostituzione delle fonti fossili d'energia.

Le recenti decisioni assunte a Marrakesh (2001), nel corso della settima Conferenza delle Parti della Convenzione sui Cambiamenti Climatici, consentono ai paesi con impegni di riduzione di servirsi delle attività in campo agricolo e forestale per raggiungere gli impegni interni di riduzione delle emissioni. In questo contesto anche il settore agricolo-forestale del nostro paese potrà dare un contributo considerevole in questo senso, grazie soprattutto alla crescita delle nostre foreste, in fase di recupero provvigionale; ai fenomeni di ricolonizzazione naturale dei terreni agricoli abbandonati; l'arboricoltura da legno; la riduzione degli incendi.

Allo stesso tempo, l'adozione di questi strumenti nelle politiche nazionali per la stabilizzazione climatica potrà fornire nuovi strumenti di promozione degli investimenti nei settori agricolo e forestale.

# 1. Introduzione

Dall'inizio dell'era industriale a oggi la concentrazione d'anidride carbonica (CO<sub>2</sub>) nell'atmosfera è aumentata del 32%, passando da 280 parti per milione (ppm) (in volume) a circa 370 ppm. Vieppiù, come dimostrano le analisi delle concentrazioni di CO<sub>2</sub> misurate nelle bolle d'aria intrappolate nei ghiacciai artici e antartici, accoppiate alle misurazioni dirette delle concentrazioni nell'atmosfera, gran parte dell'aumento è avvenuto negli ultimi decenni.

La CO<sub>2</sub>, come altri gas atmosferici, quali metano (CH<sub>4</sub>), protossido d'azoto (N<sub>2</sub>O), biossido di zolfo (SO<sub>2</sub>), ozono (O<sub>3</sub>), etilene (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>), cloroflocarburati (CFC), ha la capacità d'intrappolare l'energia termica emessa dalla superficie terrestre solare provocando un riscaldamento dell'atmosfera terrestre e l'alterazione di altri fattori che descrivono il clima. Questo fenomeno, ormai universalmente noto come "effetto serra", è simile a quello che avviene nelle serre, al cui interno la temperatura è maggiore rispetto a quella esterna, grazie alla capacità dei materiali di protezione di farsi attraversare dalle radiazioni solari a onda corta e non permettere la fuoriuscita di radiazioni a onda più lunga.

Già all'inizio del secolo scorso si era ipotizzato che fattori di origine antropica potessero influire sul clima, attraverso la modifica della naturale composizione dell'atmosfera. Tuttavia, è solo a partire dal 1979, con la prima Conferenza sul clima globale, organizzata dal *World Meteorological Organization* (WMO), che il problema dell'intensificarsi dell'effetto-serra viene posto all'attenzione dell'opinione pubblica.

Questa preoccupazione si basava su un dato ormai convalidato dalla comunità scientifica: la crescita tendenziale della temperatura media della superficie terrestre.

L'emissione di gas-serra nell'atmosfera prodotta nel corso degli anni '90 per uso di combustibili fossili è stata stimata in circa 6,3 miliardi di tonnellate di carbonio (GtC) l'anno<sup>1</sup>. Di questa grandezza, almeno un quarto deriva dalla deforestazione che, secondo le ultime stime fornite dalla FAO<sup>2</sup>, nel corso dell'ultimo decennio è stata pari a circa 16 milioni di ettari l'anno. Complessivamente, la quantità di carbonio nell'atmosfera è aumentata di 3,3 miliardi l'anno, mentre la differenza è riassorbita – più o meno nella stessa proporzione – dagli oceani e dagli ecosistemi agro-forestali.

Quest'ultimi, e in particolare gli ecosistemi forestali, si trovano quindi ad avere un duplice ruolo nei confronti dei cambiamenti climatici: da una parte rappresentano una parte del problema, rilasciando grandi masse di gas-serra nell'atmosfera; dall'altra, viceversa, possono offrire una serie di opzioni nelle strategie di mitigazione, basate prioritariamente sulle politiche d'espansione della superficie forestale globale, di conservazione delle foreste esistenti e, più in generale, di controllo delle dinamiche di cambiamenti d'uso del suolo e sullo sviluppo di forme di gestione che massimizzino l'accumulo di biomassa (e quindi di carbonio) per unità di superficie.

In secondo luogo, i cambiamenti della temperatura, dell'illuminazione, del vento, delle piogge e di ogni altro fattore climatico – unitamente all'acidificazione dei suoli, alla deposizione di sostanze azotate nei suoli, all'inquinamento della troposfera da ozono e da altri inquinanti, alla riduzione dello strato d'ozono stratosferico – stanno producendo effetti considerevoli sugli ecosistemi vegetali di ogni parte del mondo, la cui entità è oggetto d'indagine scientifica e ne stanno condizionando l'evolversi, secondo modalità complesse e diversificate. In molti casi, alcuni tipi d'ecosistema (e in particolare le foreste tropicali e boreali, gli ecosistemi po-

<sup>1</sup> IEA Bioenergy - *International Energy Agency* - ([www.ioanneum.at/iea-bioenergy-task38](http://www.ioanneum.at/iea-bioenergy-task38)).

<sup>2</sup> FAO, *State of the World's Forests*. FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. 180 p., 2001.

lari e alpini, le zone umide, le praterie) sono stati già avviati a danni ingenti e irreversibili. Nel presente studio, dopo aver fornito alcuni elementi di base sul clima e sui cambiamenti climatici in atto, è presentato lo stato della conoscenza relativa agli effetti dei cambiamenti climatici sugli ecosistemi agricoli e forestali, osservati sia a livello globale sia europeo, anche sulla base di quanto emerge da diversi rapporti internazionali pubblicati negli ultimissimi anni e, soprattutto dalle informazioni e dai dati resi noti dall'*Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC).

Nella seconda parte, invece, sono prospettate le opzioni offerte dagli ecosistemi agricoli e forestali nelle strategie di contenimento dei cambiamenti climatici, anche in seguito alle decisioni maturate a livello internazionale per rendere operativo il Protocollo di Kyoto, relativo alla Convenzione Quadro sui Cambiamenti Climatici.

### 1.1 I cambiamenti climatici e le cause

I cambiamenti climatici non sono affatto un fenomeno nuovo. Il clima, infatti, è cambiato continuamente per centinaia di migliaia di anni. L'aspetto preoccupante dei cambiamenti climatici in corso è rappresentato dalla rapidità e dall'intensità con cui questi fenomeni si stanno manifestando.

Ma quali sono le cause di tali fluttuazioni? Vi sono molte ragioni per cui il clima può cambiare. Primo, le modificazioni dell'orbita terrestre che condiziona la magnitudine e la 'stagionalità' dell'energia solare che raggiunge la Terra. Secondo, la variabilità interna del sistema climatico terrestre, legato alle interazioni 'caotiche' tra gli oceani, l'atmosfera e gli altri componenti della biosfera che, essendo sistemi aperti, scambiano fra loro materia ed energia. Terzo, il clima può essere modificato da cause naturali, per esempio dalla quantità di aerosol immesso nella stratosfera dai vulcani. Infine, le variazioni della composizione chimica dell'atmosfera a causa delle attività umane.

È difficile discernere l'entità della variazione dovuta ad agenti antropici da quella dovuta ad altre cause. Tuttavia, come è stato affermato dall'IPCC, l'aumento della temperatura registrato nel corso del XX secolo (valutabile tra 0,6 e 0,7°C) è prevalentemente di natura antropica. Le attività umane hanno modificato e continuano a modificare la concentrazione e la distribuzione di gas e aerosol nell'atmosfera e la quantità, il tipo e la distribuzione della vegetazione sulla superficie terrestre. L'influenza addizionale di queste attività ha provocato una variazione della chimica dell'atmosfera, attraverso il rilascio di gas, responsabile dell'effetto serra, quali anidride carbonica (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), protossido d'azoto (N<sub>2</sub>O), biossido di zolfo (SO<sub>2</sub>), ozono (O<sub>3</sub>), etilene (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>), cloroflocarburi (CFC).

La natura e l'intensità di alcune attività antropiche che influiscono sui cambiamenti climatici e, in particolare, quelle legate all'uso di energia e del suolo, sono notevolmente aumentate nel corso del secolo scorso. Poiché è ragionevole pensare che queste possano crescere in futuro e per di più con un ritmo ancora più intenso rispetto all'attuale, anche gli effetti sul clima sono destinati ad aumentare. È quindi importante ottenere la migliore informazione possibile sulla entità e sulla velocità dei futuri cambiamenti climatici e, soprattutto, sui possibili impatti previsti sugli ecosistemi vegetali.

### 1.2 Il panorama internazionale: il ruolo dell'*Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC)

Considerando il problema potenziale dei cambiamenti climatici, il WMO istituisce nel 1988, nell'ambito del Programma sull'Ambiente delle Nazioni Unite (UNEP, *United Nations Environment Programme*), un gruppo di lavoro sui cambiamenti climatici, l'IPCC, aperto a tutti i membri dell'UNEP e del WMO.

Il ruolo dell'IPCC è di stabilire quali informazioni scientifiche, tecniche e socio-economiche siano rilevanti per comprendere i rischi dei cambiamenti climatici indotti dall'attività umana, senza produrre nuova ricerca né monitorare parametri climatici, ma basandosi principalmente sulla letteratura tecnico-scientifica prodotta a livello internazionale.

L'IPCC è costituita da tre Gruppi di Lavoro e una Unità Operativa, ciascuno con una diversa funzione:

- Il I Gruppo di Lavoro (*Working Group I*), valuta e stabilisce quali siano gli aspetti scientifici alla base dei processi climatici in genere e dei cambiamenti climatici;
- Il II Gruppo di Lavoro (*Working Group II*), stabilisce quali siano la vulnerabilità dei sistemi socio-economici e naturali, le conseguenze negative e positive e le possibilità di adattamento ai cambiamenti climatici;
- Il III Gruppo di Lavoro (*Working Group III*), valuta le possibilità per il contenimento delle emissioni di gas-serra e, più in generale, quali siano le strategie di mitigazione.

L'Unità Operativa sugli Inventari Nazionali dei gas-serra sovrintende e coordina i vari Programmi Nazionali sviluppando linee guida e metodologie per calcolare le emissioni e le rimozioni di gas serra dall'atmosfera.

L'IPCC ha completato il suo primo rapporto, il *First Assessment Report*<sup>3</sup>, nel 1990. La sua pubblicazione ha svolto un ruolo molto importante nell'istituzione della Commissione Negoziante Intergovernativa che ha poi portato all'approvazione della Convenzione sui Cambiamenti Climatici, l'*United Nations Framework Convention on Climate Change* (UNFCCC)<sup>4</sup>, da parte della Assemblea Generale delle Nazioni Unite. La Convenzione sui Cambiamenti Climatici è stata adottata nel 1992 ed è entrata in vigore nel 1994, dopo aver ricevuto la ratifica da parte di cinquanta nazioni, costituendo la rete politica di indirizzo delle tematiche legate ai cambiamenti climatici. Il primo rapporto descrive ampiamente lo stato della conoscenza conseguito dalla ricerca sul sistema climatico e sui cambiamenti climatici. Molti punti vengono enfatizzati e, in particolare, è sottolineato che l'effetto serra è un processo naturale del pianeta e che le sue dinamiche fisiche sono ampiamente conosciute. Lo studio sottolinea, inoltre, un progressivo aumento delle concentrazioni dei gas-serra, affermando che ciò sia perlopiù da imputarsi ad attività umane. Viene sottolineato che tale aumento avrebbe condotto a significativi aumenti della temperatura del pianeta e che tali incrementi sarebbero risultati molto più ampi della variazione naturale dei periodi precedenti. Nel corso del XX secolo, almeno fino alla data di preparazione dello studio, aveva registrato un aumento della temperatura della superficie terrestre di 0,5°C, un dato ampiamente coerente con le previsioni formulate dai modelli climatici per l'aumento delle concentrazioni di gas-serra ma anche comparabile con quella che era conosciuta come variazione naturale del clima. Il livello di conoscenza e i modelli climatici disponibili in quel periodo limitavano inoltre le possibilità di previsione dei cambiamenti climatici nell'ambito di alcune specifiche regioni del pianeta.

L'IPCC ha continuato anche negli anni successivi a fornire alla comunità internazionale valutazioni sui cambiamenti climatici, arrivando a redigere nel 1995 un secondo rapporto, il *Second Assessment Report*<sup>5</sup> (SAR), che ha dato un forte impulso ai processi negoziali che hanno condotto all'adozione del Protocollo di Kyoto nel 1997. Il secondo rapporto sottolinea che

<sup>3</sup> IPCC First Assessment Report. 1990 -three volumes-.

J.T. Houghton, G.J. Jenkins and J.J. Ephraums (Eds). *Scientific Assessment of Climate change*. Report of Working Group I. Cambridge University Press, UK.

W.J. McG. Tegart, G.W. Sheldon, D.C. Griffiths (Eds). *Impacts Assessment of Climate Change*. Report of Working Group II. Australian Government Publishing Service, Australia.

*The IPCC Response Strategies*. Report of Working Group III. Island Press, USA.

<sup>4</sup> UNFCCC - *United Nations Framework Convention on Climate Change*: Issues in the negotiating process (<http://www.unfccc.int/issues>).

<sup>5</sup> IPCC Second Assessment Report: *Climate Change 1995 (SAR)* -three volumes-.

J.T. Houghton, L.G. Meira Filho, B.A. Callender, N. Harris, A. Kattenberg and K. Maskell (Eds). *The Science of Climate Change*. Contribution of Working Group I to the Second Assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, UK.

R.T. Watson, M.C. Zinyowera, R.H. Moss (Eds). *Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analyses*. Contribution of Working Group II to the Second Assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, UK.

J.P. Bruce, H. Lee, E.F. Haites (Eds). *Economic and Social Dimensions of Climate Change*. Contribution of Working Group III to the Second Assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, UK.

le concentrazioni dei gas-serra continuano ad aumentare e che reali misure di riduzione delle emissioni dovranno essere affrontate per stabilizzarne le concentrazioni in atmosfera (obiettivo sancito nell'art. 2 della Convenzione sui cambiamenti climatici). Inoltre viene dichiarato che la temperatura globale continua ad aumentare e che gli ultimi anni sono risultati i più caldi a partire dal 1860. La capacità dei modelli climatici nel simulare eventi e andamenti osservati è migliorata grazie anche all'inclusione, tra gli agenti in grado di influenzare il clima, di aerosol contenenti zolfo e dell'ozono stratosferico. Nel rapporto viene dichiarato infine che il 'bilancio delle evidenze registrate suggerisce una innegabile influenza dell'attività umana sui cambiamenti climatici' ma che questa non può essere quantificata a causa di incertezze in altri fattori-chiave.

Il terzo rapporto, *Third Assessment Report (TAR) Climate Change 2001*<sup>6</sup>, sulla cui analisi si basa parte del presente studio, fornisce un quadro aggiornato degli aspetti scientifici, tecnici e socio-economici legati ai cambiamenti climatici del XXI secolo, concentrandosi sugli studi prodotti dal 1995 in poi. Il rapporto, pubblicato nel luglio 2001 e costituito dai tre contributi dei Gruppi di Lavoro, inquadra il problema dei cambiamenti climatici da un punto di vista regionale e globale, illustrando inoltre i fenomeni che si verificano in media e quelli estremi.

---

<sup>6</sup> IPCC Third Assessment Report: *Climate Change 2001 (TAR)* -three volumes-. Cambridge University Press, UK. J. T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P. J. van der Linden and D. Xiaosu (Eds.). *The Scientific Basis*. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, UK, 2001.  
J. J. McCarthy, O. F. Canziani, N. A. Leary, D. J. Dokken and K. S. White (Eds.). *Impacts, Adaptation & Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, UK, 2001.  
B. Metz, O. Davidson, R. Swart and J. Pan (Eds.). *Mitigation*. Contribution of Working Group III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, UK, 2001.

## 2. Il clima e le sue componenti

### 2.1 Le variazioni naturali

Il clima è definito come la descrizione statistica, in termini di media e variabilità, dei diversi fattori – quali temperatura, piovosità, illuminazione, vento – misurati in un periodo di tempo che può variare da alcuni mesi a migliaia di anni, su un territorio ben definito. Per il WMO tale periodo si estende su trenta anni.

In un significato più ampio, il clima è lo stato del sistema climatico (un sistema complesso, non-lineare) definito da diverse componenti, atmosfera, idrosfera, criosfera, litosfera e biosfera, che a loro volta con le loro dinamiche, composizioni e mutue interazioni contribuiscono a regolarne il corso.

A guidare questo sistema complesso è l'energia proveniente dal sole. Questa energia, in forma di radiazione elettromagnetica, è assorbita, ridistribuita dalla circolazione atmosferica e oceanica e quindi riemessa verso lo spazio a una lunghezza d'onda maggiore.

Perché il clima sia stabile su scala globale è necessario che ci sia un equilibrio tra la radiazione solare incidente sul nostro pianeta e quella emessa dalla terra verso lo spazio. Ogni fattore che modifichi la radiazione ricevuta dal sole o emessa nello spazio, la distribuzione dell'energia all'interno dell'atmosfera o tra atmosfera, litosfera e idrosfera, è in grado di influenzare il clima. Ogni alterazione del bilancio netto radiativo disponibile per il sistema terra-atmosfera è identificata con il termine 'forzante radiativo'<sup>7</sup>. Questo può essere positivo se ha l'effetto di produrre un riscaldamento della Terra e della bassa atmosfera, negativo se ha l'effetto opposto.

Circa metà della radiazione solare cade nella regione visibile dello spettro elettromagnetico, mentre l'altra metà cade in parte nel vicino infrarosso, in parte nell'ultravioletto. Ogni metro quadrato della superficie della terra esterna all'atmosfera riceve ogni anno dal sole una media di 342 Watt. Di quest'energia, il 31% è riflesso nuovamente verso lo spazio dalle nubi, dall'atmosfera e dalla superficie terrestre; la parte rimanente ( $235 \text{ Wm}^{-2}$ ) è assorbita dall'atmosfera (20%) e, per la maggior parte (49%), dalla superficie terrestre, dal suolo e dagli oceani (Figura 1).

<sup>7</sup> IPCC Third Assessment Report: *Climate Change 2001 (TAR)* -three volumes-. Cambridge University Press, UK.  
J. T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P. J. van der Linden and D. Xiaosu (Eds.). *The Scientific Basis*. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, UK, 2001.  
J. J. McCarthy, O. F. Canziani, N. A. Leary, D. J. Dokken and K. S. White (Eds.). *Impacts, Adaptation & Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, UK, 2001.  
B. Metz, O. Davidson, R. Swart and J. Pan (Eds.). *Mitigation*. Contribution of Working Group III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, UK, 2001.

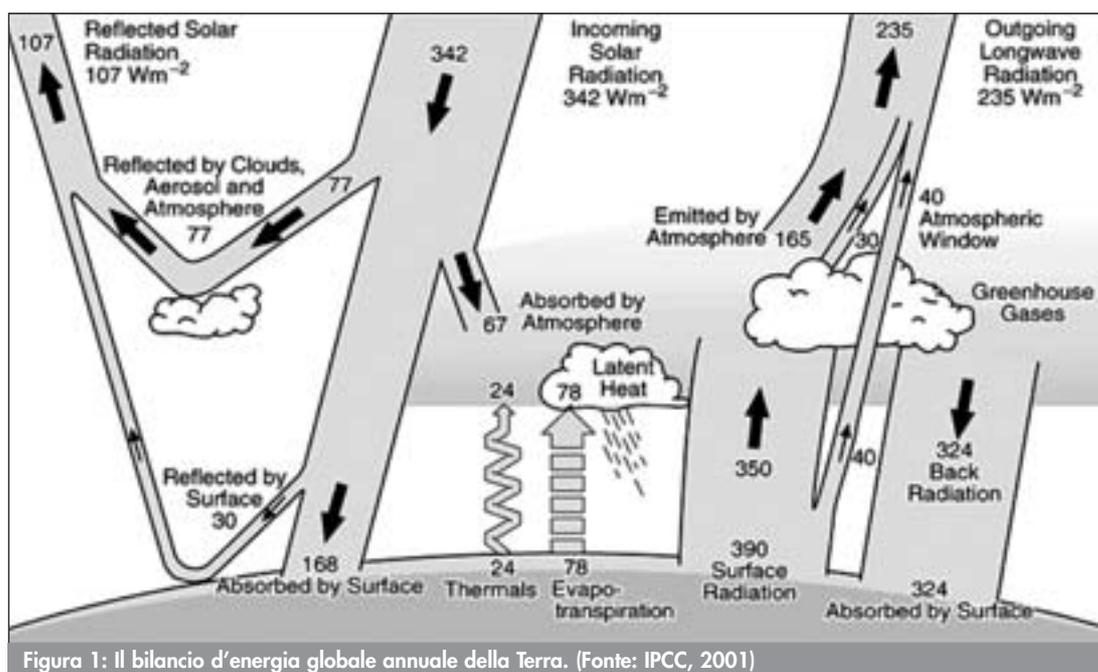


Figura 1: Il bilancio d'energia globale annuale della Terra. (Fonte: IPCC, 2001)

La Terra emette nuovamente quest'energia verso lo spazio, principalmente sotto forma di radiazione infrarossa e di vapore acqueo, che rilascia il suo calore per condensazione negli strati alti dell'atmosfera.

Il bilancio tra l'energia solare incidente sulla Terra, sotto forma di radiazione visibile, e l'energia costantemente riemessa dalla Terra verso lo spazio determina la temperatura media del nostro pianeta.

Parte della radiazione infrarossa emessa dalla terra verso lo spazio è però 'intrappolata' da alcuni gas dell'atmosfera e da questi ri-emessa in basso verso la superficie stessa. Questo processo determina il riscaldamento della Terra e degli strati della bassa atmosfera creando il cosiddetto 'effetto serra'. (In realtà, l'espressione è impropria, trattandosi di due meccanismi diversi di intrappolamento dell'energia termica: in serra, per convezione, in quanto il vetro previene la fuoriuscita dell'aria calda che sale verso l'alto, dai gas-serra degli strati bassi dell'atmosfera, per radiazione termica).

I gas-serra presenti naturalmente nell'atmosfera, che sono essenzialmente il vapor d'acqua ( $\text{H}_2\text{O}$ ), il biossido di carbonio ( $\text{CO}_2$ ), l'ozono ( $\text{O}_3$ ), il metano ( $\text{CH}_4$ ) e il protossido d'azoto ( $\text{N}_2\text{O}$ ), hanno quindi un ruolo fondamentale nella regolazione dei flussi energetici: la loro presenza fa sì, infatti, che la temperatura media della Terra sia di  $14,5^\circ\text{C}$  invece di  $-19^\circ\text{C}$ , consentendo, tra l'altro, lo sviluppo della vita così come la conosciamo. Il forzante radiativo di questi gas dipende ovviamente dal tasso di incremento delle concentrazioni di ciascun gas-serra in atmosfera, dalle loro proprietà radianti specifiche e dalle concentrazioni di altri gas-serra eventualmente già presenti in atmosfera. Si tenga conto che questi gas, nonostante siano soltanto presenti in traccia nell'atmosfera (il vapore d'acqua ha una concentrazione tipica dell'1% in volume, mentre gli altri gas rappresentano insieme lo 0,1% del volume d'aria secca), hanno un contributo radiante positivo prolungato nel tempo, fino a qualche decennio, o addirittura secoli, dal momento dell'emissione.

Anche le nubi giocano un ruolo importante nel bilancio d'energia della Terra e, in particolare, nell'effetto serra. Da una parte assorbono ed emettono radiazione infrarossa, contribuendo al riscaldamento della superficie terrestre come i gas-serra, ma dall'altra tendono a riflettere la radiazione solare creando un effetto raffreddante. L'effetto netto medio delle nubi è comunque considerato, nell'attuale sistema climatico, leggermente raffreddante, anche se si deve tener conto che questo effetto è altamente variabile a seconda dell'altezza, del tipo e delle proprietà ottiche delle nubi.

Un ruolo differente spetta invece all'*aerosol*, un'ampia classe di particelle diverse dal punto di vista chimico-fisico, che esistono in forma liquida e solida. Esse sono generate sia da

fenomeni naturali (incendi, eruzioni vulcaniche) sia da attività umana (impianti termici e traffico veicolare). Le aeroparticelle possono originarsi non solo per emissione diretta dalle sorgenti, ma anche per trasformazione di alcuni inquinanti, quali ossidi di zolfo (SOx), ossidi di azoto (NOx) e Composti Organici Volatili (COV). Le particelle presenti in atmosfera riflettono e diffondono verso lo spazio parte della radiazione solare che altrimenti inciderebbe sulla superficie terrestre, provocandone un suo raffreddamento. Ma, diversamente dai gas-serra, non si accumulano e poiché i loro tempi di permanenza in atmosfera sono brevi, dell'ordine di giorni o settimane, il loro effetto non è prolungato nel tempo.

Un altro aspetto che influisce sulle variazioni climatiche è rappresentato dalla variazione nel tempo dell'energia solare incidente sulla superficie terrestre, secondo cicli di breve termine, di undici anni, con una variazione dell'energia dello 0,1% circa; e di lungo termine, alcune di decine o migliaia di anni, dovute a piccole variazioni dell'orbita terrestre.

Quando i forzanti radiativi cambiano, il sistema climatico risponde su varie scale temporali. Le risposte più lunghe sono generalmente dovute alla grande capacità termica degli oceani e al cambiamento di stato delle superfici glaciali; ciò comporta risposte ad alcuni cambiamenti che possono durare anche migliaia di anni. Ma le molteplici e complesse interazioni di tipo fisico, chimico e biologico tra i vari componenti del sistema climatico sono differenziate anche da un punto di vista spaziale. Un esempio della complessità delle interazioni che si verificano tra i vari componenti è rappresentato dagli scambi di vapore acqueo e di calore, tra atmosfera e oceani per i processi evaporativi. Questo aspetto costituisce parte del ciclo idrologico e porta a condensazione, formazione delle nubi, precipitazioni, deflusso superficiale e scambio di energia con l'atmosfera. D'altra parte, le precipitazioni influenzano la salinità degli oceani, la sua distribuzione e la circolazione termalina. Tra l'atmosfera e gli oceani esiste, inoltre, uno scambio di CO<sub>2</sub> e di altri gas che viene mantenuto bilanciato per effetto, da una parte, dell'immagazzinamento di questo gas nelle acque fredde polari e, dall'altra, del rilascio dello stesso nelle calde acque equatoriali. Un altro esempio di interazione tra biosfera e clima è rappresentato dal fatto che da un lato la biosfera influenza la concentrazione di biossido di carbonio attraverso la fotosintesi e la respirazione e, dall'altro lato, la stessa biosfera è influenzata dal clima. La biosfera inoltre partecipa a fornire acqua all'atmosfera, attraverso l'evapotraspirazione, e influenza direttamente il bilancio radiativo dell'atmosfera poiché è in grado di modificare la porzione di luce riflessa nello spazio sul totale di quella incidente sulla superficie terrestre (albedo). Ogni cambiamento nel bilancio radiativo della Terra altera quindi il ciclo idrologico globale, le circolazioni atmosferica e oceanica, secondo processi complessi, andando quindi a modificare i regimi delle temperature e delle precipitazioni su scala regionale e globale.

## 2.2 Le variazioni climatiche indotte dall'uomo

L'uomo, come altri organismi viventi, ha un ruolo significativo nella modificazione del suo ambiente, incluso il sistema climatico. A partire dalla rivoluzione industriale, a metà del XVIII secolo, l'impatto delle attività umane sul clima ha avuto un ruolo più significativo, estendendosi su scala continentale e globale.

L'uso di combustibili fossili per uso industriale e domestico, l'uso del suolo e le variazioni d'uso del suolo, la produzione e l'uso di idrocarburi alogenati, sono le attività che maggiormente hanno contribuito ad accrescere le quantità di gas-serra e aerosol in atmosfera.

La concentrazione di CO<sub>2</sub>, per esempio, che deriva perlopiù dall'uso dei combustibili fossili e dalla variazione d'uso del suolo (e, soprattutto, dalla deforestazione), è aumentata del 30% rispetto all'era pre-industriale ed è tuttora in fase di crescita con un incremento medio annuo dello 0,4%<sup>7</sup>. Anche la concentrazione di CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O sono aumentate rispettivamente del 150% e del 16% (Tabella 1).

La sorgente primaria di CH<sub>4</sub> è rappresentata essenzialmente dal settore agricolo (soprattutto dalle risaie), da quello zootecnico, dalle discariche e dalle perdite associate alla produzione e alla distribuzione del combustibile.

L'N<sub>2</sub>O invece deriverebbe principalmente dall'uso in agricoltura di fertilizzanti contenenti azo-

to. Le concentrazioni pre-industriali di questi gas-serra sono note poiché è possibile (pur con qualche margine d'incertezza) misurarne la concentrazione atmosferica esistente diversi secoli fa, grazie alle bolle d'aria rimaste intrappolate nei ghiacciai artici e antartici<sup>9, 10</sup>. Queste 'banche dati' naturali mostrano che i cambiamenti verificatisi dall'avvento dell'era industriale supererebbero di gran lunga i cambiamenti registrati nei precedenti 10.000 anni. Per la CO<sub>2</sub> inoltre, le analisi effettuate sul <sup>14</sup>C, mostrano che le emissioni per uso di combustibili fossili rappresenterebbe la causa principale dell'aumento di concentrazione di questo gas<sup>11</sup>.

Tabella 1: Concentrazioni di alcuni gas-serra legati ad attività antropogenica

	CO <sub>2</sub> (Biossido di carbonio)	CH <sub>4</sub> (Metano)	N <sub>2</sub> O (Protossido di azoto)	HFC-23 (Idrofluoro carburo -23 )	CF <sub>4</sub> (Perfluoro metano)
Concentrazione pre-industriale	~280 ppm	~700 ppb	~270 ppb	zero	40 ppt
Concentrazione nel 1998	365 ppm	1745 ppb	314 ppb	14 ppt	80 ppt
Tasso di variazione di concentrazione	1,5 ppm/a	7,0 ppb/a	0,8 ppb/a	0,55 ppt/a	1 ppt/a
Tempo di permanenza in atmosfera	da 5 a 200 anni	12 anni	114 anni	260 anni	>50.000 anni

Fonte: IPCC, *Climate Change 2001*

Differentemente dai gas-serra appena citati, che possono derivare sia da fonti antropogeniche sia naturali, gli idrocarburi alogenati sono esclusivamente di origine antropogenica. I clorofluorocarburi (CFC), tra cui il CFC11 e il CFC12, i più importanti dal punto di vista climatico, e gli altri composti clorurati e bromurati hanno non solo un impatto sul forzante radiativo, ma conducono all'assottigliamento dello strato di ozono stratosferico. Sebbene i CFC siano sotto stretto controllo in accordo con quanto sancito dal Protocollo di Montreal, le concentrazioni dei loro sostituti, essenzialmente idroclorofluoro-carburi (HCFC) e idrofluoro-carburi (HFC), sono in crescita e non sono sotto controllo, poiché non portano alla distruzione della fascia di ozono. Questi nuovi composti sono gas ad effetto serra con un potere riscaldante molto maggiore rispetto alla CO<sub>2</sub>.

Anche le concentrazioni di NO<sub>x</sub> (NO ed NO<sub>2</sub>), CO e composti organici volatili (VOC) sono in progressivo aumento a causa dell'attività industriale e del traffico veicolare. Sebbene non siano direttamente gas ad effetto serra, sono i principali precursori dell'O<sub>3</sub> troposferico, un potente gas-serra, la cui concentrazione sarebbe aumentata del 40% rispetto alla metà del 1800<sup>7</sup>.

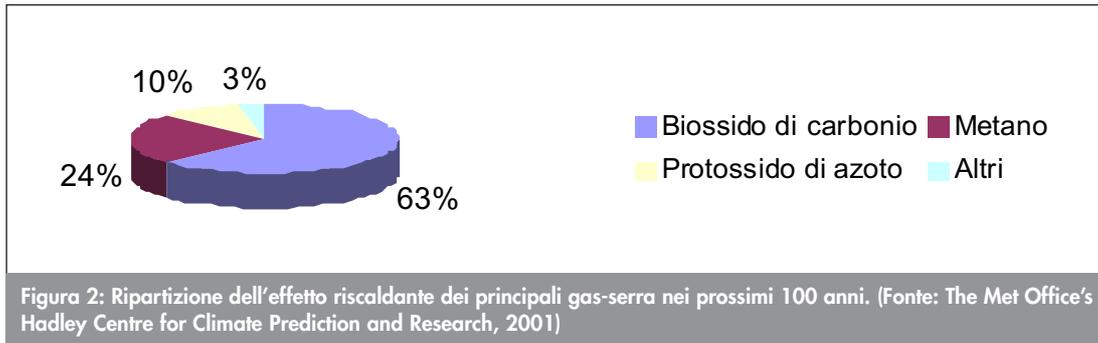
Le emissioni di SO<sub>2</sub> derivanti dall'uso di combustibili fossili, e in particolare di carbone hanno incrementato la concentrazione di aerosol in atmosfera. Questo aspetto è interessante perché la presenza di aerosol ha un effetto raffreddante sul clima e dunque può in parte mitigare gli effetti di riscaldamento prodotto dai gas-serra.

L'attività umana, legata in particolare all'uso dell'energia e al cambio d'uso del suolo, rimane la causa dominante delle alterazioni delle concentrazioni fin qui illustrate nei principali gas-serra. Questo è particolarmente evidente per alcuni clorofluorocarburi, quali il CFC11 e

<sup>7</sup> IPCC Third Assessment Report: *Climate Change 2001 (TAR)* -three volumes-. Cambridge University Press, UK. J. T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P. J. van der Linden and D. Xiaosu (Eds.). *The Scientific Basis*. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, UK, 2001.  
J. J. McCarthy, O. F. Canziani, N. A. Leary, D. J. Dokken and K. S. White (Eds.). *Impacts, Adaptation & Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, UK, 2001.  
B. Metz, O. Davidson, R. Swart and J. Pan (Eds.). *Mitigation*. Contribution of Working Group III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, UK, 2001.  
<sup>9</sup> D.M Etheridge, L.P. Steele, R.J. Francey and R.L. Langenfelds. Atmospheric methane between 1000 A.D. and present: Evidence of anthropogenic emissions and climate variability. *Journal of Geophysical Research*, 103, 15.979-15.993, 1998.  
<sup>10</sup> T. Güllük, F. Slemr and B. Stauffer. Simultaneous measurements of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and N<sub>2</sub>O in air extracted by sublimation from Antarctica ice cores: Confirmation of the data obtained using other extraction techniques. *Journal of Geophysical Research*, 103, 15.971-15.978. 978, 1998.  
<sup>11</sup> Tom M.L. Wigley. *The Science of Climate Change: Global and U.S. perspectives*. National Center For Atmospheric Research, June 29, 1999.

il CFC12, che non sono presenti in atmosfera in modo naturale, ma anche per CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O. Il contributo antropogenico alla variazione delle concentrazioni di quest'ultimi gas è virtualmente certo, in parte per la rapidità dei cambiamenti di concentrazione che si sono verificati dalla metà del XVIII secolo, ma anche perché i cambiamenti possono essere ben simulati usando modelli appropriati.

Calcolando l'effetto riscaldante nei prossimi cento anni delle attuali emissioni di gas-serra, si ottiene che la CO<sub>2</sub> è responsabile da sola dei 2/3 del riscaldamento atteso nel futuro (Figura 2).



### 2.3 I cambiamenti climatici osservati su scala globale

Secondo i dati pubblicati nel 2001 dall'IPCC<sup>12</sup>, la temperatura media della superficie terrestre è aumentata nel corso del XIX secolo di  $0,6 \pm 0,2^{\circ}\text{C}$ . Più recentemente, il NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*), la istituzione statunitense che da qualche decennio a questa parte fornisce informazioni e dati sul clima globale, dopo aver analizzato i dati meteorologici provenienti da migliaia di stazioni localizzate in diverse parti del mondo ([www.noaa.gov](http://www.noaa.gov)), ha informato che la temperatura media globale nel 2002 è stata pari a  $14,56^{\circ}\text{C}$ , di  $0,56^{\circ}\text{C}$  superiore rispetto alla media delle temperature registrate dal 1880 (da quando cioè sono in atto misurazioni sistematiche della temperatura e degli altri fattori che descrivono il clima) ad oggi. Il valore registrato nel 2002 risulta secondo solo a quello del 1998, quando la temperatura era stata di  $14,68^{\circ}\text{C}$ . Nella *top five* di questa speciale graduatoria, troviamo il 1997, il 1995 e il 1990 rispettivamente.

In un secolo, la temperatura media è aumentata di  $0,60^{\circ}\text{C}$ , di cui — sempre secondo il NOAA — circa un terzo è avvenuto nell'ultimo decennio, il più caldo nella serie di temperature registrate strumentalmente (Figura 3). Le nuove analisi indicano anche che il contenuto d'energia degli oceani è incrementato significativamente a partire dagli anni '50. Inoltre, l'intervallo di temperature, tra la massima e la minima diurna, si sta restringendo a causa delle temperature minime che aumentano ad un tasso doppio di quello con cui aumentano progressivamente le temperature massime (rispettivamente  $0,2^{\circ}\text{C}$  contro  $0,1^{\circ}\text{C}$  per decennio).

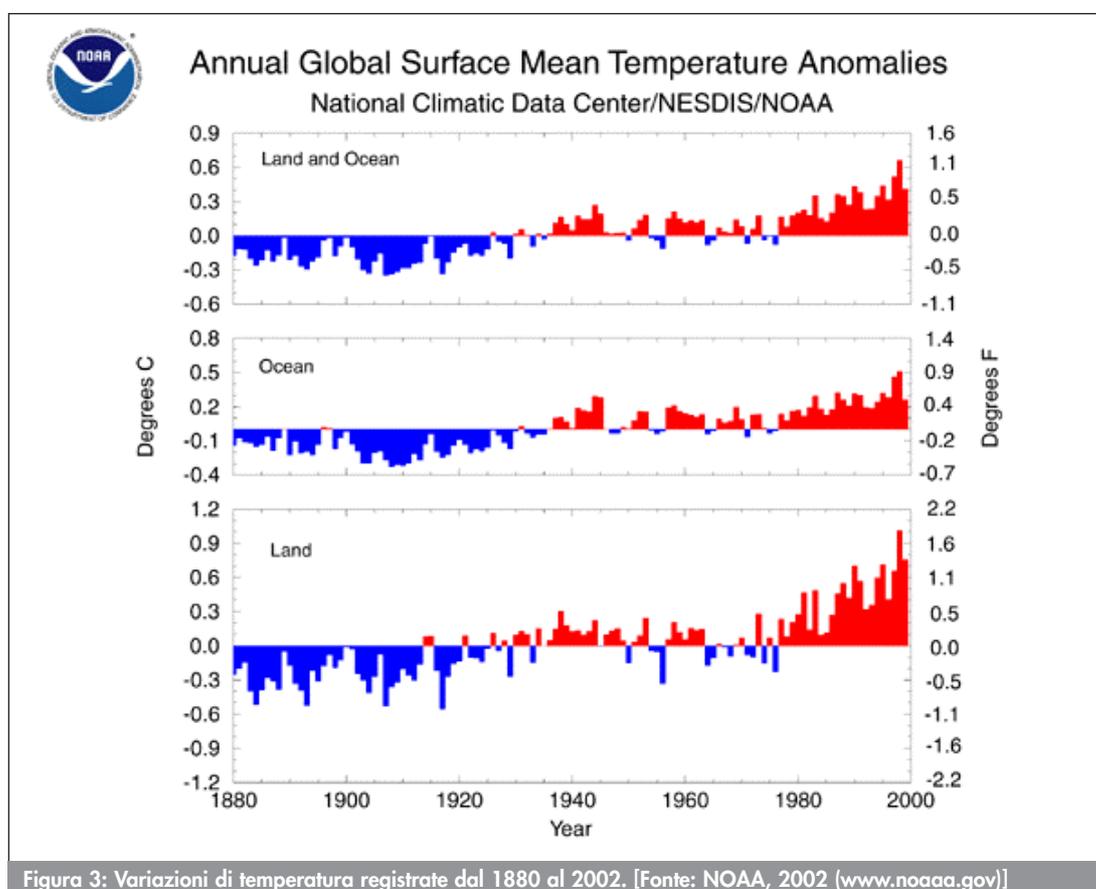
Recentemente, uno studio condotto da un gruppo di ricercatori del *Goddard Institute for Space Studies* della NASA (<http://www.giss.nasa.gov/edu/>) ha indicato che i cambiamenti osservati della temperatura implicano che la Terra assorbe  $0,5 \text{ Watt m}^{-2}$  in eccesso rispetto a quella che emette nello spazio. Questo sbilancio, attribuito dai ricercatori ai gas-serra aggiunti nell'atmosfera nell'ultimo secolo, indica che il clima ha solo parzialmente risposto a causa dell'effetto inerziale degli oceani. Ciò significa che il riscaldamento finora registrato è parziale e un addizionale riscaldamento di  $0,5^{\circ}\text{C}$  è da ritenere probabile, anche se la composizione chimica dell'atmosfera dovesse rimanere invariata agli attuali livelli.

<sup>12</sup> Albritton D.L. and Meira Filho L.G. Technical Summary. In: *The Scientific Basis*. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, UK, 21-83, 2001.

Le precipitazioni medie annuali hanno continuato ad aumentare alle medie ed alte latitudini dell'Emisfero Nord, eccetto che nell'Asia Orientale, ed è molto probabile che l'incremento sia stato dello 0,5-1% per decennio. E' presumibile che nelle regioni sub-tropicali (10°N-30°N) dell'Emisfero Nord ci sia stata una diminuzione delle precipitazioni di circa lo 0,3%/decade nel corso dello scorso secolo. Alle medie latitudini dell'Emisfero Nord è verosimile che ci sia stato, negli ultimi 50 anni del XX secolo, un aumento del 2-4% nel verificarsi degli eventi estremi, quali siccità e alluvione, in particolare per i primi in alcune zone dell'Africa e dell'Asia.

Secondo lo stesso rapporto<sup>12</sup>, la velocità d'innalzamento del livello del mare nel corso del XX secolo è stato dell'ordine di 1,0-2,0 mm/anno, con un innalzamento complessivo di 0,1-0,2 m nel corso del secolo scorso.

E' molto probabile infine che la copertura nevosa sia diminuita dal 1960 ad oggi del 10% in estensione superficiale.



<sup>12</sup> Albritton D.L. and Meira Filho L.G. *Technical Summary*. In: *The Scientific Basis*. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, UK, 21-83, 2001.

### 3. Gli effetti dei cambiamenti climatici globali sugli ecosistemi vegetali

Gli ecosistemi vegetali sono soggetti a una serie di pressioni. Ma tra tutte, quelle che hanno un ruolo predominante nell'apportare le maggiori modifiche sono sicuramente il cambio d'uso del suolo, la domanda di risorse e d'energia e la crescita demografica. Negli ultimi anni, tuttavia, a queste si è aggiunta una pressione di nuovo tipo: il cambiamento del clima. Quest'ultimo, per entità ed estensione, costituisce un'importante causa di modificazione degli ecosistemi e dei beni e servizi che da questi si originano.

Innumerevoli osservazioni e studi sperimentali realizzati a livello internazionale evidenziano l'esistenza di un legame tra i cambiamenti climatici in atto e alcuni processi biologici e fisiologici di animali e piante<sup>7</sup>. Questi legami si manifestano a volte in maniera più o meno evidente, quali la trasgressione (migrazione) altitudinale e longitudinale di specie animali e vegetali; in altre occasioni, invece, in maniera impercettibile e dissimulata, quali l'anticipo della data di schiusura delle gemme di molte specie vegetali. Ma c'è una lista lunghissima d'eventi che cominciano a manifestarsi solo oggi, ma che possono aver avuto inizio tanti anni fa, i cui legami con i cambiamenti climatici sono ora ben riconoscibili e distinti.

Uno studio riportato nel Terzo Rapporto sui Cambiamenti Climatici (TAR)<sup>7</sup> realizzato dall'IPCC ha portato alla realizzazione di un database con più di 2.500 articoli riguardanti le relazioni tra cambiamenti climatici e alcuni processi fisici e biologici di piante e animali. Dalla selezione degli articoli più significativi che, in particolare, si occupano degli effetti delle variazioni della temperatura in ambito regionale e degli andamenti osservati in periodi di tempo lunghi almeno 10 anni, risulta che, da un totale di più di 600 specie di piante e animali analizzati, approssimativamente più del 90% di queste specie (più di 550) mostra di aver subito dei cambiamenti nel tempo. Di queste 550 specie, circa l'80% (più di 450) mostra di aver subito dei cambiamenti che vanno nella direzione prevista dalle conoscenze scientifiche che correlano la temperatura a ciascun aspetto considerato nelle diverse specie. La possibilità che i cambiamenti mostrati dall'80% delle specie analizzate siano casuali è trascurabile. Per quel che riguarda invece i ghiacciai, il pack, l'estensione/scioglimento della copertura nevosa o l'estensione dei ghiacci su corpi idrici interni, sono stati presi in considerazione più di 150 siti. Di questi, il 67% (più di 100) hanno mostrato dei cambiamenti nel tempo e di questi 100, circa il 99% ha mostrato andamenti nella direzione attesa dalle conoscenze scientifiche relative ai processi che si innescano, in quei determinati siti, all'innalzarsi della temperatura.

Molti sono gli esempi di effetti dei cambiamenti climatici sugli ecosistemi che si possono considerare. Tra quelli riportati nel TAR<sup>7</sup>, evidenze scientifiche mostrano che la stagione di crescita vegetativa delle piante si sarebbe allungata da 1,2 a 3,6 giorni per decade nell'Emisfero Nord e, in particolare, alle latitudini più alte dove anche l'innalzamento delle temperature è stato più consistente. Anche l'attività fotosintetica estiva, basata sull'Indice Normalizzato Differenziale della Vegetazione (NDVI) stimato da dati satellitari, è cresciuta dal 1981 al 1991<sup>13</sup>,

---

<sup>7</sup> IPCC Third Assessment Report: *Climate Change 2001 (TAR)* -three volumes-. Cambridge University Press, UK. J. T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P. J. van der Linden and D. Xiaosu (Eds.). *The Scientific Basis*. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, UK, 2001.

J. J. McCarthy, O. F. Canziani, N. A. Leary, D. J. Dokken and K. S. White (Eds.). *Impacts, Adaptation & Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, UK, 2001.

B. Metz, O. Davidson, R. Swart and J. Pan (Eds.). *Mitigation*. Contribution of Working Group III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, UK, 2001.

<sup>13</sup> Myneni R.B., Keeling C.D., Tucker C.J., Asrar G. and Nemani R.R. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981-1991. *Nature*, 386, 698-702, 1997.

simultaneamente ad un incremento dell'entità del ciclo annuale della CO<sub>2</sub> a partire dagli anni '60 e, in particolare, durante gli anni '80<sup>14</sup>. Un altro esempio di impatto dei cambiamenti climatici sugli ecosistemi è rappresentato dall'anticipo di inizio fioritura di alcune specie vegetali. Uno studio di 36 specie di piante, realizzato nella parte centrale degli Stati Uniti, evidenzia un anticipo di fioritura di 7,3 giorni in media dal 1936 al 1998<sup>15</sup>.

Un altro aspetto degli effetti dei cambiamenti climatici è l'impatto sulla biodiversità. La biodiversità, come noto, è valutata a diversi livelli:

- a livello genetico, come ricchezza di genotipi differenti all'interno di una stessa popolazione;
- a livello di specie, come varietà di specie in un'area;
- a livello di ecosistema, come ricchezza di ecosistemi in una data regione.

Le previsioni formulate a livello globale fanno ritenere che possa presentarsi una modifica degli *habitat* naturali e semi-naturali<sup>16</sup>. I processi principali che fanno sentire la loro influenza sulla biodiversità sono la perdita e la frammentazione di *habitat*, l'introduzione di specie esotiche invasive e gli effetti diretti su riproduzione, predominanza e sopravvivenza causati dai trattamenti chimici e meccanici realizzati dall'uomo.

Le pressioni appena citate sono comunque indipendenti dai cambiamenti climatici e, quindi, la domanda critica che ci si pone è se questi ultimi avranno l'effetto di rallentare o accelerare la perdita di biodiversità. Le risposte a questa domanda sono diverse e i pareri contrastanti. Secondo alcuni esperti<sup>17</sup>, l'incremento dell'uso di composti azotati e delle concentrazioni di CO<sub>2</sub> favorirà tutte quelle specie che possiedono proprietà fisiologiche tipiche delle specie invasive. Secondo altri<sup>18</sup>, il raddoppio delle quantità di azoto all'interno del ciclo biogeochimico di questo elemento ad opera di attività antropiche, sta conducendo ad un aumento della perdita di diversità biologica tra le piante adattate ad un uso efficiente dell'azoto, e tra gli animali e i microrganismi che dipendono da queste. In una valutazione dei rischi della flora alpina svizzera<sup>19</sup>, Kienast *et al.*<sup>19</sup> sostengono invece che la biodiversità in termini di specie potrebbe aumentare o almeno rimanere invariata a seconda dei vari scenari sui cambiamenti climatici formulati a livello globale. Infine, secondo altri esperti di settore, che hanno sviluppato un modello qualitativo per valutare gli scenari di biodiversità al 2100<sup>20</sup>, saranno le formazioni vegetali e naturali e i prati e pascoli dell'area mediterranea a subire il maggiore cambiamento di biodiversità a causa della forte influenza, in quest'area, di tutti i processi che guidano i cambiamenti di biodiversità. Gli ecosistemi temperati dell'emisfero nord subiranno invece in futuro, secondo queste stesse stime, i minori cambiamenti poiché i maggiori cambiamenti d'uso del suolo sono già stati realizzati.

<sup>14</sup> Keeling C.D., Chin J.F.S. and Whorf T.P. Increased activity of northern vegetation inferred from atmospheric CO<sub>2</sub> measurements. *Nature*, 382, 146-149, 1996.

<sup>15</sup> Bradley N.L., Leopold A.C., Ross J. and Huffaker W. Phenological changes reflect climate change in Wisconsin. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 96, 9701-9704, 1999.

<sup>16</sup> V.H. Heywood and R.T. Watson. *Global Biodiversity Assessment*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1152 p., 1996.

<sup>17</sup> Dukes J.S. and H.A. Mooney. Does global change increase the success of biological invaders? *Trends in Ecology and Evolution*, 14, 135-139, 1999.

<sup>18</sup> Vitousek P.M., Aber J.D., Howarth R.W., Likens G.E., Matson P.A., Schindler D.W., Schlesinger W.H. and Tilman D.G. Human alteration of the global nitrogen cycle: sources and consequences. *Ecological Applications*, 7, 737-750, 1997.

<sup>19</sup> Kienast F., Wildi O. and Brzezicki B. Potential impacts of climate change on species richness in mountain forests: an ecological risk assessment. *Biological Conservation* 83, 291-305, 1998.

<sup>20</sup> Sala O.E., Chapin F.S. III, Armesto J.J., Berlow E., Bloomfield J., Dirzo R., Huber-Sanwald E., Huenneke L.F., Jackson R.B., Kinzig A., Leemans R., Lodge D.M., Mooney H.A., Oesterheld M., Poff N.L., Sykes M.T., Walker B.H., Walker M. and Wall D.H.. Biodiversity: global biodiversity scenarios for the year 2100. *Science*, 287, 1770-1774, 2000.

### 3.1 L'agricoltura

Molte sono state le pressioni esercitate sul settore agricolo nel corso dell'ultimo secolo e tra queste, in particolare, l'accresciuta domanda di alimenti destinati a consumo umano e animale e la degradazione del suolo.

La degradazione dei suoli, che può essere indotta da erosione, accumulo di sostanze chimiche, saturazione idrica e salina, rimane comunque una delle principali emergenze dell'agricoltura globale. Secondo i dati diffusi dall'UNEP<sup>21</sup>, nel solo periodo immediatamente successivo alla II Guerra Mondiale, il 23% circa dei terreni agricoli mondiali, dei pascoli permanenti e delle foreste è stato sottoposto a degradazione. Secondo più recenti stime, la perdita annuale di terreno si aggira intorno ai 5-10 milioni di ettari (Mha) l'anno<sup>22</sup>. Ci sono inoltre segnali che mostrano un rallentamento nella velocità di espansione dell'irrigazione a causa degli effetti negativi da questa generate: dal 10 al 15% delle terre irrigate sono degradate in qualche modo a causa di fenomeni di allagamento e salinizzazione<sup>23</sup>.

Anche i cambiamenti climatici contribuiscono a creare degli impatti sul settore agricolo. Si pensi, per esempio, alle rese dei raccolti la cui risposta ai cambiamenti climatici varia ampiamente a seconda delle specie e delle *cultivar*, delle condizioni del suolo, degli effetti della CO<sub>2</sub> e di altre condizioni locali. Secondo uno studio riportato sul TAR<sup>24</sup>, si può affermare che, con un livello medio di confidenza (che va dal 33 al 67%), un riscaldamento di soli pochi gradi potrà portare ad un aumento delle rese agricole delle zone temperate, anche se con alcune variazioni regionali. Con proiezioni di riscaldamento maggiori la maggior parte delle rese produttive delle stesse zone diventerebbero generalmente negative. In questo caso alcune strategie di adattamento proprie del settore agricolo, quali la traslazione temporale delle date di semina, la fertilizzazione, la pratica dell'irrigazione e la selezione di opportune varietà, potrebbero avere l'effetto di limitare le perdite e migliorare le rese.

Nelle zone tropicali, invece, dove alcune coltivazioni sono già vicine alla temperatura massima tollerata e dove i terreni aridi predominano, le rese potrebbero diminuire anche con minimi cambiamenti nella temperatura. Dove poi sono previste diminuzioni delle precipitazioni le rese sarebbero ancora più basse secondo un livello di confidenza medio. Secondo un livello alto di confidenza (che va dal 67 al 95%), si può affermare che temperature minime più alte condurranno ad aumenti delle rese nelle zone temperate e a decrementi nelle zone a basse latitudini, mentre temperature massime più alte potrebbero essere svantaggiose per diversi tipi di coltura.

Per quel che riguarda le pratiche di adattamento agronomico, secondo alcuni studi, sono più efficaci alle medie latitudini delle regioni sviluppate rispetto alle basse latitudini delle zone in via di sviluppo<sup>25, 26</sup>. Nella Tabella 2 sono mostrate le variazioni percentuali delle rese agricole, con e senza adattamenti agronomici, evidenziate da alcuni studi in cui sono stati presi in considerazione diversi scenari di cambiamenti climatici. Le barre verticali mostrano l'intervallo di variazione delle rese di una data coltivazione, senza e con adattamento, evidenziato da ciascuno studio, (l'autore è riportato in fondo alla colonna). Chiaramente si nota che l'uso di pratiche di adattamento riducono le perdite in sette studi su otto. La mediana delle rese con adattamento si sposta verso l'alto rispetto alla mediana delle rese senza adattamento

<sup>21</sup> Oldeman R.L., Hakkeling T.A. and Sombroek W.G. *World Map of the Status of Human-Induced Soil Degradation*, 2nd Rev. Ed. International Soil Reference and Information Centre, Wageningen, The Netherlands, 1991.

<sup>22</sup> Scherr S.J. and Yadav S. *Land Degradation in the Developing World: Issues and Policy Options for 2020*. International Food Policy Research Institute (IFPRI), Washington, DC, USA, No. 44, 2 p., 1997.

<sup>23</sup> Alexandratos N. (ed.). *World Agriculture: Towards 2010. An FAO Study*. John Wiley and Sons, Chichester, United Kingdom, 488 p., 1995.

<sup>24</sup> B. Metz, O. Davidson, R. Swart and J. Pan (Eds.). IPCC Third Assessment Report: Climate Change 2001 (TAR). *Impacts, Adaptation & Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Cambridge University Press, UK, 2001.

<sup>25</sup> Rosenzweig C. and Iglesias A. The use of crop models for international climate change impact assessment. In: *Understanding Options for Agriculture Production*. J. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, pp. 267-292, 1998.

<sup>26</sup> Parry M., Fischer C., Livermore M., Rosenzweig C. and Iglesias A. Climate change and world food security: a new assessment. *Global Environmental Change*, 9, S51-S67, 1999.

in sei su otto studi. Due studi, quelli relativi alla Mongolia e alla Romania, non mostrano questo spostamento verso l'alto poichè nel primo caso non si è tenuto conto degli adattamenti agronomici avendo registrato delle rese positive e, nel secondo caso, perchè è l'effetto dell'anticipo della semina del mais.

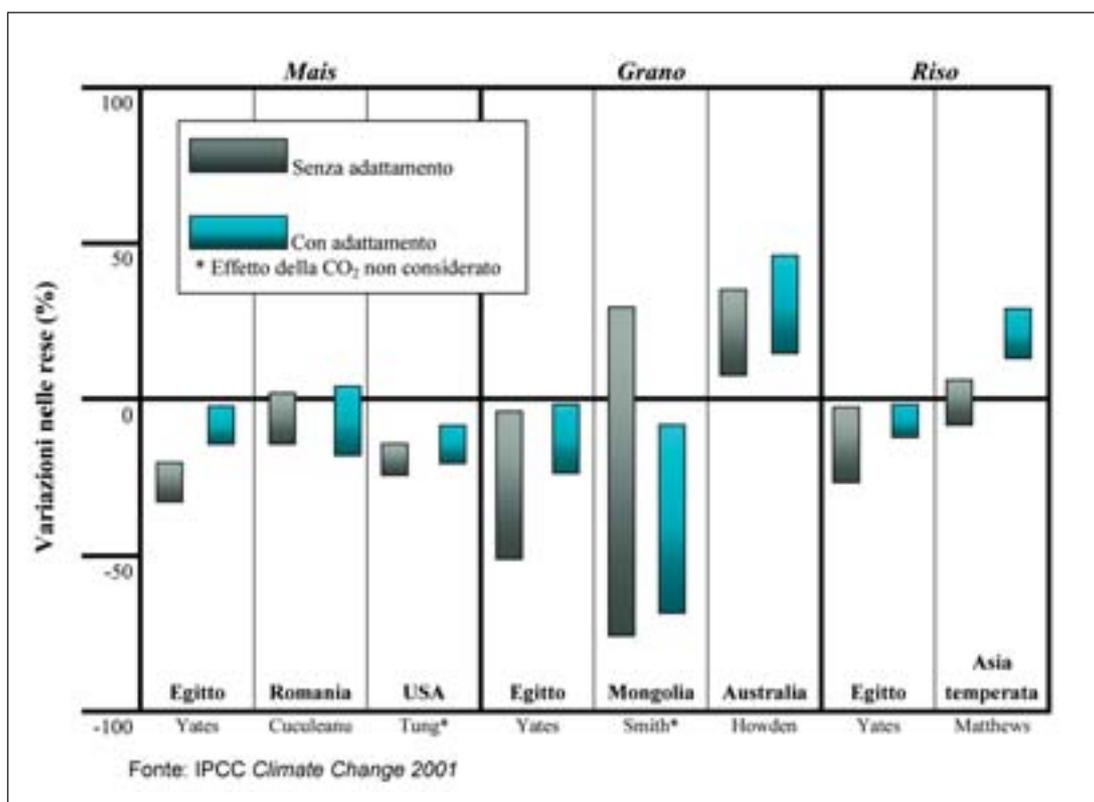


Tabella 2: Confronto delle variazioni percentuali delle rese agricole secondo diversi scenari di cambiamenti climatici, in presenza o assenza di pratiche agronomiche di adattamento.

### 3.1.1 La risposta delle piante all'aumento della concentrazione di CO<sub>2</sub>

Un impatto diretto dei cambiamenti climatici in atto è innanzi tutto legato all'aumento *per se* della concentrazione in atmosfera della CO<sub>2</sub>. Molti esperimenti condotti in diverse aree del globo riferiscono di risposte positive delle piante all'aumento della CO<sub>2</sub>, una sorta di "effetto fertilizzante". Un effetto che può ritenersi ovvio, giacché la fotosintesi, il processo che permette alle piante di convertire l'energia luminosa in energia chimica, ha proprio nella CO<sub>2</sub> e nell'acqua i suoi mattoni di base. Tant'è che nei decenni passati era molto diffusa la pratica di aggiungere artificialmente CO<sub>2</sub> nelle serre per aumentare la produttività delle colture.

In realtà, una risposta nell'accrescimento delle piante è stata notata in diversi esperimenti basati sull'arricchimento artificiale della CO<sub>2</sub> nell'ambiente fisico, ma solo nel breve periodo e su piante giovani; se questo aumento nella produttività delle piante possa continuare nel tempo è un aspetto che rimane ancora dubbio; infatti, qualche ricerca indica che spesso questo effetto stimolante della CO<sub>2</sub> sulla crescita possa attenuarsi nel giro di pochi anni.

Invero, vari studi condotti su ecosistemi forestali non hanno rilevato alcun segno di tale effetto fertilizzante. E non mancano, *viceversa*, gli studi che indicano effetti negativi: alcune specie, tra cui per esempio, molti salici reagirebbero negativamente all'aumento della CO<sub>2</sub>. Una conseguenza di questa diversa risposta da specie a specie nei confronti dell'aumento della CO<sub>2</sub> nell'atmosfera può tradursi in una modificazione della competizione tra le specie.

Estrapolare i dati ottenuti dalle colture sperimentali sottoposte ad elevate concentrazioni di CO<sub>2</sub> a quelli ottenibili in condizioni di crescita naturale è un problema di non facile soluzione. Anche la sola delimitazione fisica delle aree sperimentali in campo aperto, può co-

stituire un artificio tecnico, poiché tende a modificare l'ambiente in cui le piante crescono. In ogni caso gli esperimenti condotti all'aria aperta con arricchimento di CO<sub>2</sub> rappresentano indubbiamente la modalità sperimentale più realistica, anche se utilizzano drastiche concentrazioni dell'inquinante e modificano fortemente l'ambiente naturale in cui le colture vengono coltivate.

Una coltivazione di cotone esposta ad una concentrazione elevata di CO<sub>2</sub> di 550 ppm mostra un incremento di biomassa e di resa di raccolto rispettivamente del 37 e del 48%. Questo effetto è stato attribuito ad un incremento dell'area fogliare, ad una più intensa fioritura e ad un prolungamento del periodo di ritenzione dei frutti<sup>27</sup>. Alle stesse concentrazioni, le rese in granella di coltivazioni di frumento primaverile sono incrementate dell'8-10% in condizioni di disponibilità idrica per le piante<sup>28</sup>. Secondo lo stesso studio, inoltre, si può arrivare a un aumento di produzione in granella del 15-16%, alle stesse concentrazioni di CO<sub>2</sub>, ottimizzando l'apporto di composti azotati e l'irrigazione. Se, sulla base di questi risultati, si estrapolano linearmente i dati di resa ottenibili in condizioni ideali con una concentrazione di 700 ppm di CO<sub>2</sub> doppia rispetto a quella attuale, si ottengono aumenti del 28%<sup>29</sup>.

### 3.1.2 Gli effetti combinati dell'aumento della temperatura e della CO<sub>2</sub>

Come è noto, nelle piante C<sub>3</sub>, che producono un composto a tre atomi di carbonio nel corso della fotosintesi, l'aumento della temperatura favorisce la fotorespirazione e dunque l'effetto positivo dell'aumento della CO<sub>2</sub> sulla produttività fotosintetica è più evidente in questo tipo di piante, specialmente a temperature più alte<sup>30, 31</sup>. D'altra parte, l'aumento delle temperature medie notturne favorisce la perdita di carbonio dalle colture, in quanto aumenta il ritmo della respirazione notturna delle parti aeree delle piante<sup>32</sup>.

A temperature medie, il raddoppio della CO<sub>2</sub> in pieno campo ha l'effetto di produrre sul lungo tempo un 30% di aumento delle rese in semi di riso; tuttavia, per aumento della temperatura di 1°C, quelle stesse rese in granella di riso coltivato ad alte concentrazioni di CO<sub>2</sub> mostrano un decremento del 10%<sup>33</sup>. Simili risultati vengono riportati per la soia e per il frumento<sup>34, 30</sup>. Nel caso del riso, l'effetto dell'aumento della CO<sub>2</sub> può anche diventare negativo ad alte temperature (superiori ai 36,5°C), a causa di un effetto negativo sulla fioritura<sup>33</sup>.

### 3.1.3 Gli effetti combinati della disponibilità idrica e della CO<sub>2</sub>

Sebbene la conduttanza stomatica diminuisca al crescere delle concentrazioni di CO<sub>2</sub>, il rapporto tra la CO<sub>2</sub> ambiente e quella intercellulare non è modificata nelle piante e dunque la fotosintesi non risulta essere limitata dagli stomi in presenza di concentrazioni elevate, rispetto a quelle normalmente presenti in ambiente<sup>35</sup>.

<sup>27</sup> Mauney J.R., Kimball B.A., Pinter P.J., Lamorte R.L., Lewin K.F., Nagy J. and Hendrey G.R. Growth and yield of cotton in response to a free-air carbon dioxide enrichment (FACE) environment. *Agricultural and Forest Meteorology*, 70, 49-67, 1994.

<sup>28</sup> Pinter P.J. Jr., Kimball B.A., Garcia R.L., Wall G.W., Hunsaker D.J. and LaMorte R.L. Free-air CO<sub>2</sub> enrichment: responses of cotton and wheat crops. In: *Carbon Dioxide and Terrestrial Ecosystems*. Academic Press, San Diego, CA, USA, 215-249, 1996.

<sup>29</sup> Reilly, J. Agriculture in a changing climate: impacts and adaptation. In: *Climate Change 1995. Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change*. Scientific-Technical Analyses. Contribution of Working Group II to the Second Assessment Report of The IPCC. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 429-467, 1995.

<sup>30</sup> Bowes G., Vu J.C.V., Hussain M.W., Pennanen A.H. and Allen L.H. Jr. An overview of how rubisco and carbohydrate metabolism may be regulated at elevated atmospheric CO<sub>2</sub> and temperature. *Agricultural and Food Science in Finland*, 5, 261-270, 1996.

<sup>31</sup> Casella E., Sousanna J.F. and Loiseau P. Long term effects of CO<sub>2</sub> enrichment and temperature increase on a temperate grass sward. In: *Productivity and water use. Plant and Soil*, 182, 83-99, 1996.

<sup>32</sup> Amthor J.S. Plant respiratory responses to elevated carbon dioxide partial pressure. *Advance in Carbon Dioxide Research*, 61, 35-77, 1997.

<sup>33</sup> Horie T., Baker J.T., Nakagawa H. and Matsui T. Crop ecosystems responses to climatic change: rice. In: *Climate Change and Global Crop Productivity*. CAB International, Wallingford, United Kingdom, 81-106, 2000.

<sup>34</sup> Mitchell R.A.C., Mitchell V.J., Driscoll S.P., Franklin J. and Lawlor D.W. Effects of increased CO<sub>2</sub> concentration and temperature on growth and yield of winter wheat at 2 levels of nitrogen application. *Plant Cell Environment*, 16, 521-529, 1993.

<sup>35</sup> Drake B.G., Gonzales-Meler M.A. and Long S.P. More efficient plants: a consequence of rising atmospheric CO<sub>2</sub>. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 48, 607-637, 1997.

Un altro aspetto interessante delle interrelazioni tra coltivazioni-CO<sub>2</sub>-acqua è l'effetto sulla evapotraspirazione. Secondo numerosi studi scientifici, gli effetti di elevate concentrazioni di CO<sub>2</sub> sull'evapotraspirazione di cotone<sup>36</sup> e frumento a ciclo primaverile<sup>37, 38</sup> sono stati ridotti su coltivazioni che dispongono abbondantemente di fertilizzanti azotati. Sul riso, in condizioni di pieno campo, l'arricchimento della CO<sub>2</sub> ha ridotto del 15% l'evapotraspirazione a 26°C, ma la ha incrementata del 20% a 29,5°C<sup>33</sup>. Un forte decremento dell'evapotraspirazione e dell'uso di acqua sembra essere caratteristico anche delle piante C<sub>4</sub>, quali il mais, ma gli effetti a livello di captazione d'acqua non sono ancora chiari.

Secondo recenti ricerche l'aumento della crescita delle piante indotto dalla CO<sub>2</sub> può essere dovuta principalmente al miglioramento dell'efficienza d'uso dell'acqua e solo secondariamente all'aumento diretto della fotosintesi.

### 3.2 Le foreste

Le foreste forniscono molti beni e svolgono numerose funzioni, che vanno dalla fornitura di legname e di prodotti non legnosi, alla regolazione di alcuni cicli biogeochimici, quali quello dell'acqua e del carbonio, alla conservazione dei suoli, al mantenimento e regolazione della biodiversità e alla regolazione delle riserve di carbonio. A questi aspetti vanno affiancati quelli ricreazionali, culturali e sociali, funzione non meno importanti delle prime, che da sempre le foreste hanno avuto in relazione all'uomo.

Gli effetti dell'interferenza umana sui ciclo naturale dei gas responsabili dell'effetto serra sono destinati ad alterare i beni e le funzioni appena descritti, con conseguenze rilevanti sull'intero sistema socio-economico.

Gli ecosistemi terrestri hanno un ruolo importante nel ciclo globale del carbonio, non fosse altro che per l'estensione su scala planetaria. Secondo un recente studio della FAO<sup>39</sup>, 125 Gt di carbonio (1 Gt è pari a un miliardo di tonnellate) sono scambiate annualmente tra la vegetazione, i suoli e l'atmosfera, circa i 2/5 degli scambi totali di carbonio tra la terra e l'atmosfera. Le foreste assorbono e rilasciano carbonio, contribuendo da sole all'80% di questi scambi tra ecosistemi terrestri ed atmosfera.

Da numerosi studi prodotti, risulta che la deforestazione è una delle principali fonti di emissione di carbonio in atmosfera: evidenze suggeriscono che abbia costituito 1/4 delle emissioni antropogeniche totali<sup>40</sup>. Altre evidenze scientifiche<sup>41</sup> suggeriscono che la biosfera terrestre può essere gestita in modo da accumulare nei prossimi 50 anni da 60 a 87 Gt di carbonio nelle foreste e altri 23-44 Gt di carbonio nei suoli agricoli.

La superficie forestale mondiale ammonta a circa 3.870 milioni di ha, secondo quanto riportato nello Stato delle Foreste del Mondo 2001 della FAO<sup>42</sup>, di cui circa il 95% è costituito da foreste naturali e seminaturali e il 5% da piantagioni. Questa stima della copertura forestale

<sup>33</sup> Horie T., Baker J.T., Nakagawa H. and Matsui T. Crop ecosystems responses to climatic change: rice. In: *Climate Change and Global Crop Productivity*. CAB International, Wallingford, United Kingdom, 81-106, 2000.

<sup>36</sup> Dugas W.A., Heuer M.L., Hunsaker D., Kimball B.A., Lewin K.F., Nagy J. and Johnson M. Sap flow measurements of transpiration from cotton grown under ambient and enriched CO<sub>2</sub> concentrations. *Agricultural and Forest Meteorology*, 70, 231-245, 1994.

<sup>37</sup> Kimball B.A., Pinter P.J. Jr., Garcia R.L., LaMorte R.L., Wall G.W., Hunsaker D.J., Wechsung G., Wechsung F. and Karschall T. Productivity and water use of wheat under free-air CO<sub>2</sub> enrichment. *Global Change Biology*, 1, 429-442, 1995.

<sup>38</sup> Kimball B.A., LaMorte R.L., Pinter J., Pinter P.J., Wall G.W., Hunsaker D.J., Adamsen F.J., Leavitt S.W., Thompson T.L., Matthias A.D. and Brooks T.J. Free-air CO<sub>2</sub> enrichment and soil nitrogen effects on energy balance and evapotranspiration of wheat. *Water Resources Research*, 35, 1179-1190, 1999.

<sup>39</sup> Climate change and forests. In: *State of the World's Forests 2001*. FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations, 60-73, 2001.

<sup>40</sup> Houghton R.A. The annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use, 1850-1990. *Tellus Series B - Chemical and Physical Meteorology*, 51 (2), 298-313, 2003.

<sup>41</sup> Brown S., Sathaye J., Cannel M. and Kauppi P. Management of forests for mitigation of greenhouse gas emissions. In: *Climate Change 1995, impacts, adaptations and mitigation of climate change: Scientific-Technical Analyses*. Report of Working Group II, IPCC, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 773-797, 1995.

<sup>42</sup> The status of forests: the Global Forest Resources Assessment 2000. In: *State of the World's Forests 2001*. FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations, 29-59, 2001.

**GLI EFFETTI DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI GLOBALI  
SUGLI ECOSISTEMI VEGETALI**

supera le precedenti, realizzate nel 1990 e nel 1995, non tanto per un reale incremento della superficie ma per l'uso di una diversa definizione di foresta.

Nella tabella 3 sono mostrate le aree forestali distribuite nelle diverse regioni del pianeta così come emergono dal *Global Forest Resources Assessment 2000* della FAO.

Tabella 3: Aree forestali del mondo: ripartizione per regione

Regione	Area superficiale (milioni di ha)	Totale delle foreste (foreste naturali e piantagioni forestali)		Foreste naturali (milioni di ha)	Piantagioni forestali (milioni di ha)
		Area (milioni di ha)	% dell'area superf. % delle foreste montane		
Africa	2.978	650	22 17	642	8
Asia	3.085	548	18 14	432	116
Europa	2.260	1039	46 27	1007	32
Nord e Centro America	2.137	549	26 14	532	18
Oceania	849	198	23 5	194	3
Sud America	1.755	886	51 23	875	10
<b>Totali mondiali</b>	<b>13.064</b>	<b>3.870</b>	<b>186 100</b>	<b>3.682</b>	<b>187</b>

Fonte: FRA 2000, FAO, 2001

L'Europa e il Sud America hanno la più alta copertura forestale, rispettivamente il 27 e 23%, mentre l'Oceania ha la più bassa. Circa il 30% dell'area superficiale mondiale è costituita da foreste. La proporzione dell'area superficiale interessata da copertura forestale è assai variabile da regione a regione: la metà circa della superficie dell'Europa e del Sud America è ricoperta da foreste ma lo stesso si può dire solo di 1/6 dell'Asia.

Inoltre i 2/3 delle foreste mondiali sono situate in soli 10 Paesi: la Federazione Russa, il Brasile, il Canada, gli Stati Uniti, la Cina, l'Australia, la Repubblica Democratica del Congo, l'Indonesia, l'Angola e il Perù (Figura 4).

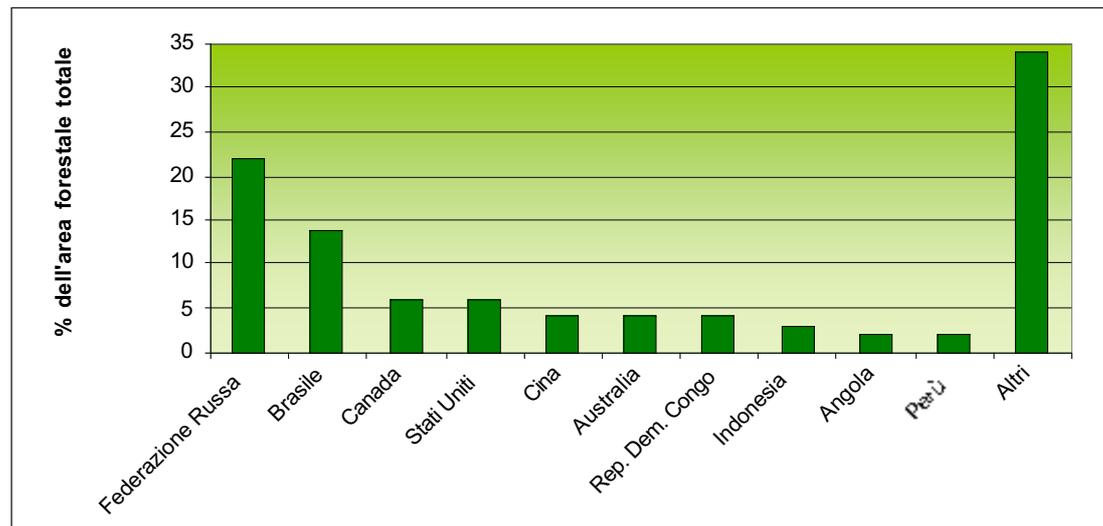


Figura 4: Foreste globali: ripartizione tra le nazioni con la maggiore copertura forestale (Fonte: FRA 2000, FAO 2001).

Per quel che riguarda le piantagioni forestali, la cui valutazione nel FRA 2000 ha previsto per la prima volta l'uso di un'unica definizione, la stima mondiale è stata di 187 milioni di ha di piantagioni, il 5% dell'area forestale globale. I dati sulle aree delle piantagioni forestali (tabella 4) mostrano che l'Asia rappresenta il continente con la maggiore area di piantagioni forestali, con il 62% delle piantagioni forestali mondiali, seguita dall'Europa con il 17%.

Le 10 nazioni con le maggiori aree a piantagioni forestali (Figura 5) possiedono complessiva-

mente l'80% delle aree a piantagione forestale del mondo. Il 60% circa delle piantagioni forestali mondiali sono localizzate in soli 4 Stati: Cina, India, Federazione Russa e Stati Uniti. Le specie maggiormente utilizzate per le piantagioni forestali sono del genere *Pinus* ed *Eucalyptus*, costituendo rispettivamente il 20 e il 10% dell'area mondiale delle piantagioni forestali. Dai confronti con la valutazione precedente fatta nel 1995 emerge comunque che la diversità delle specie impiegate nelle attività di piantagione sta aumentando.

Tabella 4: Piantagioni forestali del mondo: ripartizione per regione

Regione	Area forestale tot. (milioni di ha)	Area delle foreste naturali (milioni di ha)	Area delle piantag. foreste (milioni di ha)	% delle piantag. sull'area forest. delle reg.	% delle piantag. sul tot. dell'area delle piantag.
Africa	6.50	642	8	1	4
Asia	548	432	116	21	62
Europa	1.039	1.007	32	3	17
Nord e					
Centro America	5.49	532	18	3	9
Oceania	198	194	3	2	2
Sud America	886	875	10	1	6
<b>Totali mondiali</b>	<b>3.869</b>	<b>3.682</b>	<b>187</b>	<b>5</b>	<b>100</b>

Fonte: FRA 2000

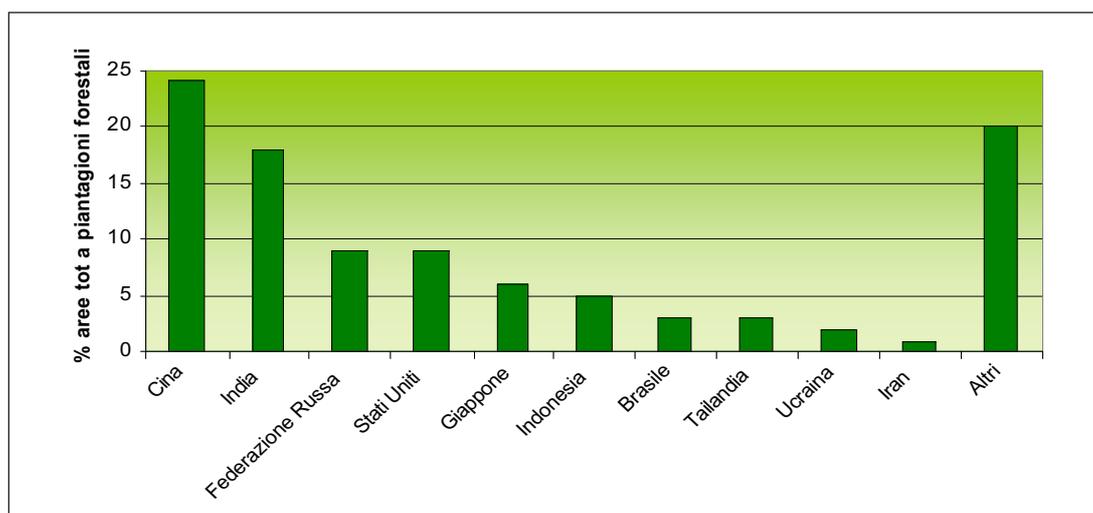


Figura 5: Nazioni con le maggiori aree a piantagione forestale nel mondo. (Fonte: FRA 2000, FAO 2001).

### 3.2.1 Le foreste e i cambiamenti climatici

Gli ecosistemi naturali debbono fronteggiare il più rapido riscaldamento mai registrato dalla fine dell'ultima era glaciale. Questi cambiamenti influenzerebbero soprattutto la distribuzione e la composizione delle foreste e quindi diverrebbero necessari gli interventi di gestione per mitigare gli effetti dei fenomeni di spostamento delle fasce climatiche.

Le caratteristiche principali degli scenari formulati dall'IPCC<sup>39</sup> prevedono che entro la fine del secolo in corso si possa avere la seguente situazione:

- la concentrazione atmosferica della CO<sub>2</sub> raddoppierà;
- la temperatura media globale aumenterà da 1,5 a 4,5 °C;
- le precipitazioni aumenteranno globalmente dal 3 al 5%;

<sup>39</sup> Climate change and forests. In: *State of the World's Forests 2001*. FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations-, 60-73, 2001.

- il livello del mare crescerà di circa 45 cm.

Per poter valutare gli effetti dei cambiamenti del clima sulle foreste è necessario formulare delle previsioni a livello regionale. C'è un largo consenso sul possibile andamento delle temperature a livello regionale. In particolare, l'aumento più consistente è previsto alle alte latitudini dell'emisfero nord mentre un aumento più contenuto sarà caratteristico delle zone vicine ai tropici o interessate da circolazione oceanica.

Anche se i modelli climatici più accreditati postulano aumenti su scala globale delle precipitazioni, le previsioni a livello regionale sono meno affidabili. I parametri che maggiormente condizioneranno la crescita delle foreste saranno gli aumenti delle temperature alle alte latitudini e i cambiamenti nei regimi di precipitazione alle basse latitudini.

Le regioni con temperature più alte e precipitazioni invariate o più basse rischio, vedranno ridursi l'umidità del suolo, che ridurrà la produttività delle piante e aumenterà la probabilità di verificarsi degli incendi.

Le foreste, potrebbero resistere per qualche tempo ai cambiamenti climatici ma le risposte sul lungo-terminale dipenderanno dalla capacità delle diverse specie di adattarsi alle nuove condizioni e di cambiare distribuzione geografica. Questa capacità dipenderà dalle variazioni intra e inter-specifiche delle risposte fisiologiche delle piante alle diverse condizioni ambientali, dalle caratteristiche dei terreni, dalle relazioni ecologiche tra le specie. Anche la natura del paesaggio e l'intensità delle attività umane saranno fattori determinanti. La frammentazione degli ecosistemi, per esempio, influenzerà le modalità con cui le specie cambieranno posizione geografica in seguito allo spostamento delle fasce climatiche.

Molto probabilmente, nel caso del riscaldamento globale, le diverse specie troveranno più "semplice" spostarsi ad altitudini più alte piuttosto che a latitudini maggiori, percorrendo grandi distanze.

I cambiamenti previsti nella distribuzione delle specie potrebbe comportare l'accorpamento di più specie e la perdita di qualcuna di queste.

Aumenti della copertura forestale potrebbero avere un effetto *feedback* sul clima, modificando la temperatura superficiale e influenzando la distribuzione della CO<sub>2</sub> atmosferica. Le foreste, infatti, hanno un'albedo più bassa (riflettono meno luce) degli altri ecosistemi e, attraverso le radici, hanno più facilmente accesso all'acqua del suolo rispetto ad altre formazioni vegetali. Di conseguenza possono assorbire più luce solare, che porta ad un riscaldamento, e perdere più vapore attraverso l'evaporazione, che porta da un raffreddamento.

Nelle zone tropicali i processi evaporativi sono dominanti e l'effetto netto delle foreste è di raffreddare l'atmosfera; quindi alle latitudini maggiori l'effetto dell'albedo è dominante, portando tuttavia a un riscaldamento locale.

### 3.2.2 *Gli impatti dei cambiamenti climatici sui differenti ecosistemi forestali*

#### Le foreste temperate

Le foreste temperate saranno interessate dal riscaldamento soprattutto alle alte latitudini (2,6°C al di sopra delle temperature registrate negli anni '70, entro la metà del XXI sec.) e da cambiamenti nel regime delle precipitazioni alle basse latitudini. Gli *stress* idrici alle basse latitudini (bacino del Mediterraneo e Stati Uniti sud-occidentali) potranno condurre ad una mortalità rilevante delle piante, mentre le temperature più alte potrebbero incrementarne la loro crescita. Si prevede uno spostamento delle fasce climatiche verso le zone polari di 5 km l'anno. L'area potenziale disponibile per la crescita delle foreste temperate aumenterà probabilmente dal 7 al 58%. Di contro, l'alta frammentazione di questa fascia forestale potrebbe rappresentare un limite alla diffusione di alcune specie arboree, e avere un impatto sulla fauna che vive in questi ecosistemi, con una significativa perdita a scapito di alcune specie.

#### Le foreste boreali

Le foreste boreali subiranno il più alto aumento di temperatura tra tutti gli ecosistemi forestali. Si prevede che il riscaldamento sia maggiore in inverno (4°C al di sopra dei livelli degli an-

ni '70 entro la metà del XXI sec.) e leggermente più bassi in estate (da 2,5 a 3°C al disopra dei livelli degli anni '70). La ridotta disponibilità d'acqua nel suolo aumenterà lo *stress* sulle piante dei fenomeni di siccità e la frequenza degli incendi. Si prevede uno spostamento verso nord delle fasce climatiche di 5 km/anno con una mortalità e sostituzione delle piante (latifoglie invece di conifere) soprattutto lungo le propaggini meridionali dell'area boreale. I modelli utilizzati per prevedere i cambiamenti di lungo termine suggeriscono che la risposta possa essere sia una riduzione (fino al 36%) che un'espansione (fino al 16%) dell'area delle foreste boreali, anche se sembra più verosimile l'ipotesi della riduzione. Poche sono le specie forestali che potrebbero estinguersi, ma a livello locale le perdite di specie potrebbe essere rilevanti.

#### Le foreste tropicali

Le foreste tropicali fronteggeranno un aumento di temperatura di 2°C al disopra dei livelli registrati negli anni '70 entro la metà del XXI sec., con un forte incremento nelle zone continentali interne. Sono comunque attesi dei cambiamenti più rilevanti nelle precipitazioni rispetto alle temperature. In funzione degli scenari formulati, l'area forestale tropicale potrebbe diminuire del 30% o espandersi del 38%. Nella maggior parte delle zone tropicali comunque l'impatto delle attività umane, quali la deforestazione e gli incendi, saranno più importanti dei cambiamenti climatici nel determinare l'area forestale. La diminuzione dell'area forestale tropicale, in particolare quella pluviale, potrebbe molto probabilmente condurre ad una significativa perdita di specie.

#### Le foreste tropicali montane

Si prevede un riscaldamento di 1-2°C entro la metà del XXI sec.; tuttavia, la minaccia maggiore è rappresentata dall'innalzamento della base delle nuvole, da cui le formazioni forestali dipendono per l'approvvigionamento idrico durante la stagione secca. L'altezza della base delle nuvole si innalzerà probabilmente di 2 metri l'anno. Dove le montagne sono isolate e non sono sufficientemente alte per permettere uno spostamento verso altitudini più elevate della vegetazione, potrebbero verificarsi l'estinzione di alcune specie montane, molte delle quali endemiche. C'è già evidenza di un tale cambiamento in Monteverde e Costa Rica (IPCC, 2001).

#### Le foreste di mangrovie

Secondo le previsioni è probabile che le mangrovie siano in grado di adattarsi all'incremento delle temperature, ma saranno minacciate dall'innalzamento del livello del mare. Questa minaccia sarà maggiore lungo le coste povere di sedimenti, come quelle delle piccole isole, e in quelle aree dove è più consistente l'attività antropica.

## 4. Il ruolo degli ecosistemi agro-forestali nella mitigazione dei cambiamenti climatici

I cambiamenti climatici e gli ecosistemi vegetali sono estremamente interdipendenti, dando luogo a relazioni estremamente complesse. Da una parte, come descritto nei paragrafi precedenti, i cambiamenti del clima hanno un impatto, anche di segno inverso, sugli ecosistemi vegetali. Dall'altra, quest'ultimi possono offrire una serie di opzioni di mitigazione di tali cambiamenti. In particolare, ai suoli agricoli e alle foreste e, più in generale, alle politiche di controllo delle dinamiche di cambiamenti d'uso del suolo viene riconosciuta una grande importanza nelle strategie di contenimento dell'accumulo di gas-serra nell'atmosfera e di mitigazione dei cambiamenti climatici.

### 4.1 Il ruolo delle foreste

Il ruolo delle foreste nelle strategie di mitigazione dei cambiamenti climatici dipende da tre presupposti.

- la CO<sub>2</sub> e gli altri gas responsabili dell'effetto-serra circolano globalmente; conseguentemente, gli sforzi per rimuoverli dall'atmosfera avranno la stessa efficacia sia che questi siano fatti nelle vicinanze delle fonti di emissione sia in altre parti dell'emisfero anche molto distanti. Per questa ragione è possibile selezionare gli interventi più efficaci tra una gamma estremamente ampia di possibilità gli investimenti in campo forestale, senza essere condizionati da fattori particolari di localizzazione territoriale.
- le foreste, attraverso la regolazione dei cicli biologici connessi al ciclo del carbonio, scambiano grandi quantità di CO<sub>2</sub> con l'atmosfera. Le piante assorbono CO<sub>2</sub> dall'atmosfera grazie alla fotosintesi, per costruire zuccheri e altri composti organici, utili per la crescita e il metabolismo. Gli alberi immagazzinano il carbonio nel legno e altri tessuti fino a quando non muoiono e si decompongono, momento in cui il carbonio è rilasciato nell'atmosfera sotto forma di CO<sub>2</sub> e altri gas di carbonio, oppure è incorporato nel suolo sotto forma di sostanza organica, per periodi più o meno lunghi, prima di essere restituito all'atmosfera. Inoltre i prodotti legnosi finiti costituiscono un'ulteriore possibilità di espandere temporaneamente la funzione fissativa.
- le foreste rappresentano un *pool* importante di carbonio, quanto a dimensione degli stock (3,9 miliardi di ettari di foreste), ma la loro corretta conservazione o espansione offre anche un'ampia serie di prodotti e servizi di grande valore ambientale ed economico. In altri termini, le motivazioni che stanno alla base delle politiche di valorizzazione delle foreste in una strategia di stabilizzazione climatica sono rafforzate da considerazioni connesse alla tutela della biodiversità, della stabilità idrogeologica, della qualità del paesaggio, ecc.

Il potenziale contributo delle foreste alla mitigazione dei cambiamenti climatici è in funzione di una serie di variabili che è difficile prevedere. Alcuni studi di recente pubblicazione affermano che le foreste possano 'sequestrare' 1-1,5 Gt di carbonio l'anno. Questo contributo, riconosciuto anche dal protocollo di Kyoto, – che può essere anche maggiore se si considera l'apporto energetico delle biomasse legnose in sostituzione delle fonti fossili d'energia – richiede l'affermazione, a livello globale, di nuovi paradigmi di gestione selvicolturale, orientati a massimizzare l'immagazzinamento del carbonio nel suolo e nel soprassuolo forestale.

Secondo quanto previsto dagli accordi maturati nell'ambito del Protocollo di Kyoto, le pratiche di gestione forestale che possono essere usate per raggiungere quest'obiettivo si basano su due tipi di approccio. Il primo approccio è di prevenire o ridurre il rilascio di carbonio dagli *stock* forestali esistenti, attraverso la creazione di parchi e aree protette, la promozione di una gestione forestale sostenibile che riduce i prelievi di legname, la lotta agli incendi (*conservation management*). Il secondo prevede interventi attivi, quali nuove piantagioni forestali su terreni agricoli o su suoli degradati, rinfoltimenti in foreste danneggiate da incendi o malattie, diradamenti, controllo delle erbe infestanti, fertilizzazione (*storage management*) ed alla promozione dell'utilizzazione di prodotti legnosi (*substitution management*).

Le foreste e, più in generale, le attività antropiche associate al settore forestale, però, contribuiscono all'aumento del livello di gas-serra nell'atmosfera. A dimostrazione di ciò, basti citare l'ultimo rapporto IPCC, secondo cui le emissioni nette di carbonio derivanti dalla deforestazione e dai cambiamenti di uso del suolo, fenomeni particolarmente rilevanti ai tropici, costituiscono il 23% delle emissioni totali annue di carbonio del pianeta. Un dato che testimonia quindi una consistente incidenza del settore forestale sui cambiamenti climatici. Le variazioni di crescita e di produzione, la distribuzione delle foreste, la composizione delle associazioni vegetali e l'intensità degli incendi, degli attacchi fitosanitari ed altre avversità possono rappresentare le cause maggiori di incidenza del settore forestale sui cambiamenti climatici.

#### 4.1.1 Strategie di mitigazione

Gli ecosistemi forestali contengono oltre la metà del carbonio accumulato negli ecosistemi terrestri, per una quantità che è stata situata in 1.200 Gt di carbonio. Le foreste boreali costituiscono le riserve maggiori tra i vari ecosistemi terrestri, avendo un 26% del carbonio totale degli *stock* terrestri e sono seguiti dalle foreste tropicali e da quelle temperate che contano rispettivamente il 20 e il 7%<sup>43</sup>. Anche il carbonio accumulato nei suoli e nelle lettiere costituisce un'altra parte significativa del *pool* totale. A livello globale le riserve di carbonio dei suoli sono più della metà delle riserve delle foreste. Ci sono naturalmente notevoli differenze tra i vari ecosistemi e i biomi forestali.

Tra l'80 e il 90% del carbonio negli ecosistemi boreali è conservato sotto forma di sostanza organica, mentre nelle foreste tropicali il carbonio si distribuisce abbastanza equamente tra vegetazione e suoli (Tabella 5). La differenza tra queste due diverse distribuzioni risiede principalmente nell'influenza della temperatura sulle velocità di accumulo e degradazione della sostanza organica.

Alle latitudini maggiori, dove le temperature sono generalmente più basse e i climi più freddi, la sostanza organica nei suoli si accumula perché è prodotta più velocemente di quanto ne sia degradata. Alle basse latitudini, invece, le temperature più alte favoriscono la rapida degradazione della sostanza organica nei suoli.

Prima del XIX sec. l'uomo ha esercitato una modesta influenza sulle riserve di carbonio del pianeta, attraverso l'uso del suolo, l'uso di combustibile e la deforestazione ma è a partire dall'inizio dell'era industriale che l'attività antropogenica fa sentire il suo effetto sul ciclo del carbonio.

Tra il 1850 e il 1980 più di 100 Gt di carbonio vengono rilasciate in atmosfera a causa del cambio d'uso del suolo, 1/3 delle emissioni antropogeniche di carbonio dell'intero periodo<sup>44</sup>. Fino alla fine del XIX sec., le foreste temperate sono state soggette ad ampi e ripetuti tagli e a degradazione. Nel XX sec le foreste temperate si sono stabilizzate, mentre quelle tropicali sono diventate la prima fonte di emissione di carbonio tra gli ecosistemi terrestri<sup>44</sup>.

Recentemente si è registrato un leggero aumento nell'area forestale dei paesi sviluppati: tra il 1980 e il 1995 c'è stato un incremento di 1,3 milioni di ha l'anno<sup>45</sup>. La deforestazione delle

---

<sup>43</sup> Dixon R.K., Brown S., Houghton R.A., Solomon A.M., Trexler M.C. and Wisniewski J. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, 263, 185-190, 1994.

<sup>44</sup> Houghton R.A. Converting terrestrial ecosystems from sources to sinks of carbon. *Ambio*, 25 (4), 267-272, 1996.

<sup>45</sup> FAO. *State of the World's Forests 1999*. Rome.

aree tropicali è stata invece quantificata nello stesso periodo in 15,5 milioni di ha per anno. L'emissione netta di carbonio che deriva dal cambio d'uso del suolo degli anni '80 è stata stimata in 2-2,4 Gt per anno equivalente a circa il 23-27 % delle intere emissioni antropogeniche<sup>40, 46</sup>. La deforestazione tropicale costituisce, comunque, il contributo principale del cambio d'uso del suolo alle emissioni di carbonio.

Anche la combustione di biomassa contribuisce al rilascio di gas-serra tra cui il metano (CH<sub>4</sub>) e il protossido di azoto (N<sub>2</sub>O). Dagli incendi delle foreste deriva il 10% del metano emesso a livello globale.

Il progressivo aumento della CO<sub>2</sub> atmosferica e dei composti azotati che si è verificato negli ultimi decenni ha prodotto probabilmente un aumento di produttività e di crescita delle piante, come già affermato precedentemente in questo lavoro. Queste evidenze sono state segnalate anche nel Nord e Sud America, vicine all'*equilibrium* biologico. Altre evidenze derivano da misure micrometeorologiche dei flussi di CO<sub>2</sub> scambiati dalle foreste e dalla valutazione della distribuzione atmosferica della CO<sub>2</sub> su scala globale. Studi recenti suggeriscono che la forestazione su terreni già in precedenza forestali la crescita delle foreste esistenti, nonché la ricrescita di quelle degradate, hanno portato all'assorbimento di 1-3 Gt di carbonio annue, compensando quasi completamente le emissioni globali causate dalla deforestazione<sup>47</sup>.

Tabella 5: Ecosistemi forestali: alcune caratteristiche degli stock di carbonio e ripartizione per regione

Ecosistema	Nazione/ regione	Densità di carbonio nella vegetaz. (t/ha)	Densità di carbonio nel suolo (t/ha)	Carbon stock nella vegetaz. (Gt)	Carbon stock nel suolo (Gt)	Carbon stock totali (Gt)
<b>Boreale</b>	Federazione Russa	83	281	74	249	323
	Canada	28	484	12	211	223
	Alaska	39	212	2	11	13
<b>Temperato</b>	Stati Uniti	62	108	15	26	41
	Europa	32	90	9	25	34
	Cina	114	136	17	16	33
	Australia	45	83	18	33	51
<b>Tropicale</b>	Asia	132-174	139	41-54	43	84-97
	Africa	99	120	52	63	115
	Americhe	130	120	119	110	229

Nota: 1 Gt= 1 miliardo di tonnellate

Fonte: Dixon et al. 1994

Di seguito saranno brevemente descritte le fondamentali strategie di mitigazione, cercando di illustrare le maggiori problematiche e le soluzioni proposte.

#### 4.1.1.a Contenimento della deforestazione

Come riferito in precedenza, i tagli irrazionali per i prelievi di risorse legnose e la distruzione di superfici forestali per creare spazio all'agricoltura, soprattutto nella regione tropicale, sono tra le maggiori cause dell'aumento dei gas-serra nell'atmosfera.

Ai tropici la deforestazione sempre più accelerata è diventata una delle maggiori preoccupazioni.

<sup>40</sup> Houghton R.A. The annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use, 1850-1990. *Tellus Series B - Chemical and Physical meteorology*, 51 (2), 298-313.

<sup>46</sup> Fearnside P.M. Global warming and tropical land-use change: greenhouse gas emissions from biomass burning, decomposition and soils in forest conversion, shifting cultivation and secondary vegetation. *Climatic change*, 46, 115-158, 2000.

<sup>47</sup> Malhi Y., Baldocchi D.D. and Jarvis P.G. The carbon balance of tropical, temperate and boreal forests. *Plant, Cell and the Environment*, 22, 715-740.

pazioni ambientali degli ultimi anni, non solo dal punto di vista dei cambiamenti climatici, ma anche per ciò che concerne la perdita di biodiversità. Secondo i dati della FAO prima citati, il tasso annuale di deforestazione ai tropici durante gli anni '80 è stato pari a 15,4 milioni di ettari. Purtroppo questo dato è andato aumentando rispetto ai decenni passati; si calcola infatti che prima degli anni '80 il tasso di deforestazione non superasse gli 11,3 milioni di ettari.

#### 4.1.1.b Riduzione della biomassa bruciata in foresta

La combustione delle biomasse forestali è un fenomeno il più delle volte legato al fenomeno degli incendi, alle utilizzazioni, al tentativo di stimolare in ambienti di savana la ricrescita della vegetazione erbacea per il pascolo, all'utilizzo di legna da ardere e di carbone ed alla distruzione dei residui rimasti dopo il taglio.

Ogni anno, proprio a causa degli incendi, viene persa una superficie di savana pari a 750.000 di ettari, risultato di antiche tradizioni e pratiche agrarie. Circa metà di questa superficie è situata in Africa. È anche molto frequente il caso di fuochi prescritti che escono dal controllo degli stessi esecutori e che si trasformano il più delle volte in incendi violenti. Il numero di tali fenomeni potrebbe quindi essere ridotto se venissero favoriti programmi educativi di prevenzione e di lotta agli incendi boschivi. Questo chiaramente, oltre a ridurre le superfici percorse dal fuoco ogni anno, avrebbe l'effetto di limitare le emissioni di carbonio nell'atmosfera terrestre.

#### 4.1.1.c Aumento dell'efficienza della legna da ardere e di altri combustibili organici

Le biomasse sono al momento la quarta più importante fonte di energia impiegata; la legna da ardere ed il carbone contribuiscono per il 10% al consumo totale di energia del pianeta. L'uso domestico delle biomasse contribuisce alle emissioni annue di gas-serra di origine antropica per un valore variabile dal 2 al 7% ([www.fao.org](http://www.fao.org)). I combustibili organici impiegati per uso domestico sono spesso convertiti in energia utilizzando però metodi poco efficienti, producendo di conseguenza un *output* energetico più basso di quello potenzialmente ottenibile.

L'uso di sistemi di produzione più efficienti permetterebbe quindi di aumentare l'*output* di energia e di ridurre quello dei gas-serra per unità di energia prodotta. Agendo in questa direzione si andrebbe riducendo la pressione esistente sulle risorse di combustibile organico del pianeta, diminuendo così i fenomeni di desertificazione e di deforestazione.

È stato calcolato che l'introduzione di sistemi più efficienti potrebbe ridurre la domanda di legna da ardere del 25-70% e si potrebbe di conseguenza ridurre anche l'emissione di gas-serra. Inoltre l'impiego di combustibili di migliore qualità, in termini di dimensioni, di contenuto di umidità e di potere calorifico, sarebbe in grado di aumentarne l'efficienza e di ridurre così le emissioni di gas-serra.

La sostituzione dell'uso di combustibili fossili con quello di combustibili organici sarebbe in grado di incidere fortemente sui cambiamenti climatici, soprattutto ai tropici. Anche uno sfruttamento più efficace dei residui forestali ed agricoli a fine energetico potrebbe essere impiegato come importante strumento di mitigazione.

#### 4.1.1.d Aumento dell'efficienza delle pratiche di esbosco

Spesso pratiche di esbosco poco efficienti sono causa di eccessivi danni ai soggetti che rimangono in foresta e di disturbo al terreno. Questi fenomeni vanno ad aumentare le emissioni di gas-serra nell'atmosfera, riducendo la capacità delle piante rimaste di fissare il carbonio. È da ricordare però, che comunque venga praticato, l'esbosco è sempre un'operazione dannosa per l'ecosistema forestale; non per questa ragione non si devono adottare quelle pratiche che permettono di ridurre al minimo il disturbo antropico. Tra questi accorgimenti vanno ricordati: lo sviluppo di piani di gestione forestale e di esbosco; la riduzione dei danni causati dalle utilizzazioni, tentando di ridurre prima del taglio finale la vegetazione che ostacola le operazioni di taglio; scegliere prima dell'abbattimento la direzione di caduta del-

le piante; cercare di utilizzare al meglio gli alberi abbattuti; introdurre pratiche post-esbosco rivolte soprattutto a garantire l'affermazione della rinnovazione.

Un esempio dei benefici che possono derivare da un miglioramento delle tecniche di esbosco proviene da uno studio recentemente completato in Malesia. E' stato provato che un maggiore controllo su tali pratiche è in grado di ridurre i danni all'ecosistema addirittura del 20-40%, garantendo un aumento della quantità di carbonio fissata da parte della vegetazione che rimane in foresta; dopo 10 anni infatti è stata calcolata una quantità di carbonio di 65 t ha<sup>-1</sup> superiore<sup>48</sup>.

#### 4.1.1.e Gestione e conservazione delle foreste esistenti

Migliorare la gestione delle foreste naturali può garantire un aumento della produttività e quindi anche della capacità di fissazione del carbonio. Questo avviene in quanto si tenta di favorirne la crescita, di mantenere massima la produttività e di limitare, per quanto sia possibile, il numero degli incendi, gli attacchi fitopatologici ed un eccessivo sviluppo della vegetazione infestante.

Ai tropici è stato stimato che circa 137 milioni di ettari di foresta sovrautilizzati potrebbero beneficiare di progetti di rinaturalizzazione attraverso la reintroduzione di specie native, minacciata da utilizzazioni legnose concentrate su singole specie<sup>49</sup>.

Risulta importante anche la creazione di aree protette, dove vengano vietate le utilizzazioni ed altre attività, allo scopo di mantenerle come fonte di fissazione del carbonio. Queste zone inoltre permettono la conservazione di particolari habitat faunistici ed un controllo delle specie animali e vegetali protette ed in via di estinzione. Bisogna però ricordare che queste particolari aree non andranno a contribuire in maniera sostanziale alla fissazione del carbonio, in quanto spesso si tratta di popolamenti che hanno già superato la maturità, dove quindi la quantità di carbonio fissata è praticamente uguale a quella emessa.

#### 4.1.1.f Usi durevoli delle foreste e dei prodotti da esse ottenibili

In una prospettiva di gestione delle foreste che mira a massimizzare le funzioni di immagazzinamento del carbonio, l'allungamento dei turni e, di conseguenza, la produzione porterebbero a risultati vantaggiosi. Fermare però le utilizzazioni, come da qualche parte è stato proposto, o adottare prelievi meno cospicui rispetto a quelli attuali, potrebbe causare nel medio periodo una significativa riduzione dell'incremento di biomassa e quindi della capacità fissativa delle foreste.

E' interessante a tale proposito riportare uno studio sui popolamenti forestali italiani<sup>50</sup>. Pur prendendo in considerazione i dati STES (1993), che indicano come il *pool* per ha dei popolamenti coetanei sia maggiore rispetto a quello dei popolamenti disetanei e come la fissazione del carbonio nei popolamenti coetanei giovani (con meno di 40 anni per le fustaie e con meno di 10 anni per i boschi cedui) sia più del doppio rispetto agli stessi popolamenti in età matura, non si ritiene opportuno creare una linea di gestione comune a tutto il contesto italiano. I dati STES (1993) indicherebbero infatti che in un progetto di mitigazione del carbonio si dovrebbe aumentare il tasso delle utilizzazioni, compreso quello dei diradamenti. I boschi italiani però non sono foreste primarie: in questa situazione i popolamenti non diradati risultano maggiormente soggetti a fenomeni, quali gli incendi, gli attacchi parassitari, schianti ecc., accompagnati da notevoli perdite di carbonio. I boschi non diradati inoltre producono assortimenti meno durevoli nel tempo.

Si può dedurre dall'analisi sopra riportata, riguardante la realtà italiana, come il tempo di

<sup>48</sup> Pinard M.A., Putz, F.E., Tay, J. & Sullivan, T.E.. Creating timber harvest guidelines for a reduced-impact logging project in Malaysia. *J. For.*, 93 (10): 41-45, 1995.

<sup>49</sup> Grainger, A. Constraints on modelling the deforestation and degradation of tropical open woodlands. *Global Ecology and Biogeography* 8 (3/4): 179-190, 1999.

<sup>50</sup> Corona P. Sustainable management of forests for atmospheric CO<sub>2</sub> depletion: the Italian case. *Journal for Sustainable Forestry* (3/4): 81-97, 1997.

permanenza dei popolamenti sia una questione molto delicata da risolvere, in quanto è fortemente dipendente dalle condizioni locali.

#### 4.1.1.g Le nuove piantagioni come fonti di fissazione dei gas-serra

La costituzione di nuove piantagioni forestali rappresenta una interessantissima opzione nelle strategie di lotta ai cambiamenti climatici. L'utilizzo di specie a rapido accrescimento su suoli aventi un contenuto iniziale di carbonio molto basso (in particolare in terreni agricoli abbandonati) e l'adozione di turni più brevi rispetto alla durata della vita media dei prodotti legnosi rappresentano l'azione più efficace per ottenere il più rapidamente possibile un consistente immagazzinamento di carbonio. E' stato calcolato che per ettaro possono venire fissate da 0.4 a 8 tonnellate ad ettaro di carbonio.<sup>51</sup>

Programmi d'afforestazione e riforestazione sono stati intrapresi in diverse aree del pianeta per controbilanciare le emissioni di carbonio. Si tratta di programmi promossi da iniziative di Paesi industrializzati o di imprese energetiche, aventi chiaramente anche finalità economiche e commerciali.<sup>52</sup>

Per ciò che riguarda invece la situazione europea, è stato calcolato che la superficie potenzialmente disponibile per progetti di afforestazione e riforestazione è pari a circa 44 milioni di ettari. Si ricorda inoltre che negli ultimi 15 anni in Europa vengono abbandonati ogni anno circa 600.000 ha di terreno precedentemente di uso agricolo, dei quali circa il 40% diventa superficie forestale nell'arco di pochi anni, grazie alla colonizzazione naturale di essi ad opera di specie arbustive e arboree forestali.

## **4.2 Il ruolo dei suoli agricoli**

La maggior parte degli ecosistemi raggiungono, in condizioni costanti, un equilibrio negli *stock* di carbonio, le cui caratteristiche dipendono dalle particolari condizioni del clima, dalle proprietà del suolo e dalle tecniche di gestione utilizzate. I cambiamenti imposti sugli ecosistemi possono alterare i bilanci tra accumuli e perdite di carbonio, spostando eventualmente gli ecosistemi verso nuovi equilibri. Dopo la conversione di foreste, prati e pascoli in suoli agricoli, per esempio, i rilasci di carbonio spesso eccedono gli acquisti, portando ad una temporanea perdita netta di carbonio verso l'atmosfera fino a quando non viene raggiunto un nuovo equilibrio<sup>49</sup>. Una porzione del carbonio perso può comunque essere recuperata adottando alcune pratiche che ne favoriscono l'accumulo. L'accumulo di carbonio nei suoli, prevalentemente sotto forma di sostanza organica, può continuare fino a che viene raggiunta una nuova condizione di equilibrio, spesso dopo diverse decadi.

Ci sono sostanzialmente due modi per incrementare gli *stock* di carbonio nei suoli agricoli<sup>50</sup>:

- cambiare tipo di gestione nell'ambito di un certo tipo di uso del suolo (esempio terra coltivata, risaia, pascolo ecc.);
- cambiare tipo d'uso del suolo (da terra coltivata a pascolo, per esempio).

In questa sezione verranno brevemente illustrate le possibilità di incrementare gli *stock* di car-

<sup>51</sup> IPCC, 2001. IPCC (2000). Land Use, Land-use Change, and Forestry. R.T. Watson, I.R. Noble, B. Bolin, N.H. Ravindranath, D.J. Verardo and D.J. Dokken (eds.). A Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, United Kingdom and New York, USA. 377 p.

<sup>52</sup> Moura-Costa P. The climate convention and evolution of the market for forest carbon offsets. *Unasylva*, 52 (206): 34-41, 2001.

<sup>53</sup> Kauppi P. and Sedjo R. Technological and Economic Potential of Options to Enhance, Maintain, and Manage Biological Carbon Reservoirs and Geo-engineering. In: *Climate Change 2001: Mitigation*. Contribution of Working Group III to the Third Assessment Report of The IPCC. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 302-343, 2001.

<sup>54</sup> Sampson R.N., Scholes R.J., Cerri C., Erda L., Hall D.O., Handa M., Hill P., Howden M., Janzen H., Kimble J., Lal R., Marland G., Minami K., Paustian K., Read P., Sanchez P.A., Scoppa C., Solberg B., Trossero M.A., Trumbore S., Cleemput O., Van, Whitmore A. and Xu D. Additional Human-induced Activities- art. 3.4. In: *Land Use, Land-use Change and Forestry*. A Special Report of the IPCC, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 377 pp., 2000.

bonio nei terreni agricoli con un certo uso e cambiando l'uso del suolo.

Nei terreni coltivati, che almeno periodicamente sono destinati alla produzione di coltivazioni arabili, la quantità di carbonio del suolo può essere preservata o addirittura aumentata, riducendo la lavorazione del terreno e rallentando, di conseguenza, la velocità di degradazione della sostanza organica. Un'altra tecnica consiste nell'aumento delle rese dei raccolti che può essere favorita fornendo sostanza organica e fertilizzanti ai terreni, utilizzando varietà colturali più adatte o irrigando i campi. Anche le tecniche di contenimento dell'erosione del suolo, per es. i terrazzamenti, le barriere contro il vento, mantengono la produttività e contribuiscono a prevenire la perdita di carbonio dai suoli.

Nei terreni destinati a pascolo, un modo per incrementare il carbonio consiste nell'introdurre nuove specie colturali, in particolare leguminose che, fissando l'azoto, aumentano la produttività e quindi l'immagazzinamento di nuova sostanza organica. Altre tecniche consistono nell'introduzione di specie a radicazione profonda, anche se è ancora incerto se la tecnica possa essere più adatta a determinate aree e non ad altre, l'utilizzo di una intensità e di una frequenza di pascolamento diversa, l'uso di nutrienti, e in particolare di quelli a base di fosforo, e il controllo degli incendi e dell'irrigazione.

Anche i cambi d'uso del suolo possono comportare un aumento degli *stock* di carbonio del suolo. È il caso, per esempio, della conversione da terreni agricoli a prati e pascoli, oppure a terreni agro-forestali e a foreste mediante la riforestazione e la afforestazione.

Un'altra forma di conversione d'uso del suolo è rappresentata dal recupero di terreno degradato, spesso abbandonato per eccessiva erosione, sovrapascolamento, desertificazione e salinizzazione. Le tecniche di recupero consistono sostanzialmente nell'introduzione di nuove specie e nel rifornire i terreni dei nutrienti e della sostanza organica persi nel tempo.

Vari tentativi sono stati fatti per arrivare a comprendere il potenziale accumulo di carbonio dei suoli raggiunto con l'utilizzo di tecniche di gestione del territorio. Nel *Second Assessment Report* dell'IPCC Cole *et al.*<sup>51</sup> hanno stimato che, assumendo che metà dei 2/3 del carbonio perso dai suoli coltivati possa essere recuperato in 50 anni, il carbonio del suolo può incrementare di circa 0,4 - 0,6 GtC/anno con l'utilizzo di tecniche appropriate. Secondo altre stime<sup>52</sup>, i potenziali d'immagazzinamento di carbonio sono stimati dalle 0,43 alle 0,57 GtC/anno nei prossimi 20-50 anni.

Recentemente è stata completata una valutazione del potenziale dei *carbon sink*<sup>50</sup>, come parte del Rapporto Speciale dell'IPCC sull'uso e sul cambio d'uso del suolo indicati con l'acronimo LULUCF. Secondo le stime presentate, una migliore gestione dell'uso del suolo può portare ad un guadagno netto di carbonio a livello globale, entro il 2010, di 0,125 GtC/anno per i terreni coltivati in genere, <0,008 GtC/anno per le risaie, di 0,026 GtC/anno per i sistemi agro-selviculturali e di 0,237 Gt/anno per i pascoli.

I potenziali guadagni di carbonio, entro il 2010, per la conversione d'uso del suolo sono stimati invece in 0,391 GtC/anno per la conversione da terreni improduttivi e prati a terreni ad uso agro-forestale, in <0,004 GtC/anno nel caso di recupero di terreni fortemente degradati, in 0,038 GtC/anno per la conversione da terreni coltivati a prati e pascoli e in 0,004 GtC/anno per la conversione di terreni aridi in terreni umidi. Gli autori della ricerca dichiarano comunque che le stime "sono approssimazioni basate sui dati disponibili" e che "per alcune previsioni relative ai *carbon storage* le incertezze possono essere pari a  $\pm 50\%$ ".

<sup>50</sup> Sampson R.N., Scholes R.J., Cerri C., Erda L., Hall D.O., Handa M., Hill P., Howden M., Janzen H., Kimble J., Lal R., Marland G., Minami K., Paustian K., Read P., Sanchez P.A., Scoppa C., Solberg B., Trossero M.A., Trumbore S., Cleemput O., Van, Whitmore A. and Xu D. Additional Human-induced Activities- art. 3.4. In: *Land Use, Land-use Change and Forestry*. A Special Report of the IPCC, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 377 pp., 2000.

<sup>51</sup> Cole C.V., Duxbury J., Frenney J., Heinemeyer O., Minami K., Mosier A., Paustian K., Rosenberg N., Sampson N., Sauerbeck D. and Zhao Q. Agricultural options for mitigation of greenhouse gas emissions. In: *Climate Change 1995: Impacts, Adaptations and Mitigation of climate change: Scientific-Technical Analyses*. Report of Working Group II, IPCC, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 745-771, 1995.

<sup>52</sup> Lal R. and Bruce J.P. The potential of world cropland soils to sequester C and mitigate the greenhouse effect. *Environmental Science and Policy*, 2, 177-185, 1999.



## 5. Le decisioni della United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC)

La Convenzione Quadro delle Nazioni Unite sui Cambiamenti Climatici (UNFCCC) e il Protocollo di Kyoto, l'accordo che prevede impegni per i paesi firmatari di limitare le emissioni dei gas-serra del 5,2 per cento rispetto a quelle del 1990 ([www.unfccc.int](http://www.unfccc.int)) hanno riconosciuto l'importanza delle tipologie di interventi nel settore forestale precedentemente descritte. I Paesi che ratificheranno il Protocollo potranno (secondo l'articolo 3.3 del Protocollo) contabilizzare le quantità di carbonio sequestrato dalle nuove piantagioni forestali realizzate tra il 1990 e il 2012; simmetricamente, però, dovranno riportare nei bilanci nazionali le perdite causate dalla deforestazione. Inoltre, il Protocollo (all'articolo 3.4) rende possibile, l'inclusione nei bilanci nazionali degli effetti di altre attività forestali e d'uso del suolo, con alcune limitazioni, tra cui quelle di essere "*direct human induced*" e che di aver avuto luogo dal 1990 in poi.

L'accordo sui *sink* di carbonio (cioè i "serbatoi" capaci di assorbire carbonio, ovverosia foreste e suoli agricoli) è stato tra i più complessi temi di negoziazione nell'attuazione operativa del Protocollo, tema infatti lasciato in sospeso a Kyoto – anche a causa dell'impiego nella documentazione ufficiale di una terminologia poco chiara e spesso ambigua. Per questa ragione a Buenos Aires, un anno dopo Kyoto, è stato demandato all'IPCC di redigere un rapporto speciale sull'uso del suolo, sul cambiamento di uso del suolo e sulla selvicoltura, al fine di investigare e risolvere i quesiti e le controversie tecniche e scientifiche connesse all'applicazione del Protocollo. Dopo la presentazione del rapporto IPCC, nel maggio 2000, sono state condotte intense negoziazioni e sofisticati dibattiti scientifici nel tentativo di sciogliere ogni incertezza e giungere a un accordo.

Un altro tema cruciale collegato ai *sink* è stato quello relativo alla possibilità di includere nei bilanci nazionali i progetti forestali realizzati in paesi in via di sviluppo grazie al *Clean Development Mechanism*, uno dei tre "meccanismi flessibili" previsti dal Protocollo di Kyoto, concepiti con l'obiettivo di utilizzare strumenti di mercato per facilitare il compito dei paesi industrializzati di raggiungere i loro impegni di riduzione delle emissioni.

Com'è noto, a L'Aia, nel 2000, le parti negoziali si sono presentate con molte posizioni contrastanti. Alcune nazioni tipicamente 'forestali', come gli USA e la Federazione Russa, hanno preteso di vantare *in toto* i crediti di carbonio derivanti dalla fissazione di carbonio che ha luogo nelle foreste del loro territorio nazionale sottoposte ad una attiva gestionale selvicolturale. Il problema di fondo era quello di come fosse possibile separare la quota di carbonio assorbito per via delle attività umane dirette (*direct human induced*, condizione – come detto in precedenza – richiesta dal testo del Protocollo) avvenute a partire dal 1990 da quelle dovute a fattori naturali – aumento dell'accumulo di carbonio nelle foreste per effetto dello stesso aumento della concentrazione di CO<sub>2</sub> nell'atmosfera e della fertilizzazione del suolo legata alla deposizione di composti dell'azoto con le piogge – e da quelle avvenute prima del 1990.

Altri paesi, tra cui l'UE e molti paesi in via di sviluppo (in modo particolare quelli più esposti ai possibili effetti dei cambiamenti climatici), intendevano limitare al massimo l'uso dei *sinks*, al fine di concentrare gli sforzi di riduzione dell'effetto serra sulle politiche energetiche di risparmio e riduzione di emissioni di gas da fonti fossili, che sono la causa principale dei cambiamenti climatici in corso.

A L'Aia, il presidente della Conferenza aveva messo sul tavolo della trattativa un testo che suggeriva di scontare dell'85 per cento i crediti che derivano dalla gestione delle foreste e di consentire l'uso dei progetti forestali tramite il *Clean Development Mechanism*, ma limitati ai soli interventi di "afforestazione" e di "riforestazione". Rimanevano esclusi, invece, i progetti finalizzati alla riduzione della deforestazione, che sarebbero comunque stati ammessi come strumento per mitigare l'impatto dei cambiamenti climatici. Questa proposta è stata bocciata

dall'UE e da gran parte dei paesi in via di sviluppo (oltre che dalle principali associazioni ambientaliste e non governative) sia perché conteneva incentivi alla realizzazione di piantagioni mono-specifiche o con specie non autoctone, sia perché nel testo non era definito un limite per l'uso di questo genere di sink.

A Marrakesh (novembre 2001), nell'ultimo giorno della Cop7, i ministri e i capi delegazione di 170 paesi sono riusciti a trovare un accordo sui *sinks*, evitando di interrompere il processo che dovrà portare i paesi alla ratifica del Protocollo. Purtroppo, proprio l'accordo sui *sinks* ha comportato un prezzo negoziale molto alto: a Bonn era stata concessa qualche decina di milioni di tonnellate di carbonio da contabilizzare tramite i *sinks* a Giappone, Canada, Australia e Nuova Zelanda, quantità pretese con la giustificazione delle attività di gestione delle foreste (un modo, secondo molti osservatori e le associazioni ambientaliste, che i paesi potranno usare per eludere gli impegni complementari relativi al risparmio e razionalizzazione energetica). A Marrakesh, la Federazione Russa ha portato avanti con successo notevoli richieste a proprio favore, in quanto contrariata dai risultati della tornata precedente di negoziati in cui le erano stati riconosciuti pochi milioni di tonnellate di carbonio in più rispetto al Canada e al Giappone – a cui l'accordo ne attribuiva rispettivamente 12 e 13 milioni – nonostante la maggiore estensione della superficie forestale russa. A Marrakesh la Federazione Russa ha chiesto e ottenuto ben 33 milioni di tonnellate. In altri termini tale accordo comporta che, tramite la costituzione di nuove piantagioni forestali realizzate dopo il 1990 e la conservazione delle foreste esistenti sul proprio territorio, i russi potranno ottenere una quantità di crediti di carbonio sufficienti per compensare gli impegni di riduzione di un paese come l'Italia o la Francia.

Tra i principali temi tecnici in discussione relativi all'uso delle foreste e dei suoli agricoli nel Protocollo di Kyoto, vi è quello relativo alle regole per rendere operativo il Protocollo stesso e una serie di norme tecniche, relative, per esempio, a: modalità di contabilizzazione, controllo, verifica e validazione dei registri delle emissioni che ogni paese dovrà tenere; modalità di misurazione dei crediti di carbonio generati dai progetti di contenimento delle emissioni – o del loro riassorbimento tramite piantagioni forestali – realizzati al di fuori dei confini nazionali; stima delle quantità di carbonio immagazzinate nelle foreste preesistenti al 1990 e di quelle costituite dopo il 1990. Questioni tecniche non di poco conto, che possono richiedere agli esperti mesi e mesi d'indagini e approfondimenti e incontri negoziali che possono far slittare i tempi oltre i limiti accettabili.

### **Il ruolo delle biomasse legnose a fini energetici**

Mentre la funzione di fissazione del carbonio da parte delle foreste (e più in generale degli ecosistemi vegetali) è ampiamente riconosciuta, il ruolo della legna da ardere, secondo quanto asserito dalla International Energy Agency dell'OCSE, come strumento per mitigare i cambiamenti climatici globali non ha ricevuto un'adeguata attenzione in sede di negoziazione del Protocollo di Kyoto. Infatti, fino a qualche anno fa, le politiche energetiche e forestali dei paesi occidentali hanno trascurato questa opzione, perché la legna era ritenuta un prodotto energetico obsoleto, inquinante, a domanda anelastica rispetto al reddito, destinato quindi ad essere emarginato dal mercato e dalla diffusione d'altre forme rinnovabili d'energia.

Da qualche tempo, invece, si registra un'intensificazione degli interessi verso la dendroenergia e più in generale verso le biomasse – che comprendono tutti i materiali prodotti direttamente e indirettamente dalla fotosintesi – come fonte energetiche. A conferma di ciò, basti citare un rapporto previsionale dell'IPCC,

(segue)

(segue)

secondo il quale alla fine del secolo in corso le biomasse saranno in grado di fornire il 50% del consumo globale d'energia (mentre oggi ne forniscono il 7%). Un forte interesse verso la bioenergia è stato espresso anche dalle principali imprese energetiche, che da qualche anno hanno investito ingenti capitali in piantagioni a biomasse. Vale la pena ricordare inoltre che, a scala globale, circa il 50 per cento della legna prelevata dai boschi è tuttora usata per il riscaldamento, l'illuminazione e la cottura dei cibi.

Il motivo di questo interesse è nella differenza sostanziale tra l'energia prodotta dai combustibili fossili e quella dalla legna. La combustione delle fonti fossili libera CO<sub>2</sub> che è stata intrappolata anche per milioni d'anni. All'opposto, la combustione della legna restituisce all'atmosfera la CO<sub>2</sub> che è stata assorbita con la crescita delle piante che, una volta tagliate, possono in tempi relativamente brevi rinnovarsi riassorbendo CO<sub>2</sub>. Inoltre, la legna è una forma energetica con basso contenuto di composti dello zolfo, disponibile localmente, tecnicamente convertibile direttamente in calore o in altre forme di combustibile. Al tempo stesso, la valorizzazione della legna può fornire una serie di benefici ambientali indiretti quali il miglioramento del paesaggio, la tutela idrogeologica del territorio e, in alcuni casi, della biodiversità, e avere una ricaduta positiva in termini occupazionali, in particolare per le comunità rurali delle aree collinari e montane e delle zone più remote.

### I crediti di carbonio

Le attività di gestione delle superfici forestali, di rivegetazione, di gestione dei suoli agricoli e dei pascoli, per poter generare crediti di carbonio in base al Protocollo di Kyoto devono aver avuto inizio dal 1990 e devono essere *direct human-induced*, cioè connesse ad espliciti e diretti interventi gestionali.

C'è una differenza sostanziale tra la prima e le altre tre attività sopra segnalate: i crediti generati dalle ultime tre attività possono essere usati *in toto*, mentre quelli generati dalla gestione forestale sono scontati dell'85 per cento. Due esempi possono essere utili per spiegare questo meccanismo. Supponiamo che un consorzio di agricoltori biologici abbia avviato a partire o successivamente al 1990 delle pratiche agronomiche (*set aside* o non coltivazione di terreni coltivati a grano, inerbimento di frutteti, ecc.) che hanno comportato un aumento del contenuto di sostanza organica — e quindi di carbonio — nei suoli. Questa differenza di contenuto di carbonio (da dimostrare con dati rigorosi) potrà essere messa sul mercato e venduta, per esempio, a un'impresa energetica (italiana, ma anche straniera). Supponiamo, invece, che un consorzio di proprietari forestali abbia attivato, successivamente al 1° gennaio 1990, una gestione delle proprie foreste che porta ad un aumento della biomassa legnosa e non legnosa (e quindi di carbonio), per esempio attraverso una riduzione del regime dei tagli o un regime di protezione totale. Ebbene, in questo caso non tutto il carbonio accumulato potrà generare crediti da mettere sul mercato, ma solo il 15 per cento di esso. Lo scomputo dell'85 per cento serve per eliminare, con approccio empirico e molto approssimato, quella frazione di carbonio che è accumulato dalle foreste per effetto del (presunto) aumento della produttività dovuto a due fattori: l'aumento della fertilizzazione dovuta alle deposizioni di azoto nei suoli e della concentrazione di anidride carbonica (come è noto, la fotosintesi, il processo che permette alle piante di convertire l'energia luminosa in

(segue)

(segue)

energia chimica, ha proprio nella CO<sub>2</sub> e nell'acqua i suoi elementi di base). Tali fattori non rispondono al requisito di essere "direct human induced", che è condizione necessaria perché i crediti, secondo il testo dell'art. 3.4 del Protocollo di Kyoto, siano ammissibili per la redazione degli inventari degli assorbimenti e delle emissioni dei gas-serra.

Le quantità complessive di crediti di carbonio ottenibili dalla gestione delle foreste sono stati all'origine del mancato accordo delle riunioni di Bonn (1999) e L'Aia (2000). In particolare, a Bonn la contesa riguardava un'appendice del testo di negoziazione, in cui erano indicate le quantità massime dei crediti di carbonio che un paese può ottenere dalle attività di gestione forestale. Dai paesi in via di sviluppo e dall'UE tali quantità erano ritenute eccessive e causa della perdita di integrità degli impegni del Protocollo, dimezzando gli impegni complessivi di riduzione delle emissioni dei gas-serra; per altri paesi, il potenziale assegnato loro era troppo basso in rapporto all'estensione del patrimonio forestale. Obiettivamente, occorre segnalare che l'appendice del testo conteneva molte incongruenze e illogicità, che attendevano di essere risolte (tra cui un valore per l'Italia, 0,18 milioni di tonnellate di carbonio l'anno, dieci volte più basso di quello preteso).

### I bilanci di carbonio

Ai paesi che hanno assunto impegni di riduzione delle emissioni, il Protocollo di Kyoto richiede di registrare i bilanci di carbonio derivanti dagli assorbimenti e dalle emissioni legate alle attività forestali incluse nell'articolo 3.3 (afforestazione, riforestazione e deforestazione) e 3.4 (gestione forestale). I metodi che consentono di stimare i bilanci tra emissioni e assorbimenti da parte delle foreste si fondano su due approcci metodologici:

- la valutazione del *budget* di carbonio basata su studi relativi alla fisiologia di singole piante o di limitate stazioni di monitoraggio; in particolare sono analizzati i dati di fotosintesi, respirazione, allocazione e decomposizione in ben definiti intervalli temporali; i flussi di carbonio tra tutte le componenti dell'ecosistema e tra questo e l'atmosfera vengono stimati analiticamente; i risultati di tali stime sono successivamente estrapolati a una scala maggiore;
- l'analisi di dati inventariali, su scala regionale o nazionale, relativi a provvigioni e incrementi di massa legnosa principale, che vengono successivamente convertiti in carbonio; in alcuni casi, soprattutto per valutazioni previsionali, tali valutazioni sono supportate da funzioni di crescita; il carbonio presente nelle componenti dell'ecosistema che non sono oggetto di tradizionali valutazioni inventariali (lettiera, suolo, massa blastometrica, sottobosco, ecc.) sono in genere stimati sinteticamente tramite parametri assunti in modo deterministico.

Il primo approccio è utile per evidenziare alcuni aspetti dei bilanci di carbonio, quali ad esempio gli effetti sulle dinamiche dell'ecosistema dovuti all'aumento della concentrazione di CO<sub>2</sub>, di ozono o della temperatura, ma l'estrapolazione di tali valutazioni all'universo è spesso condizionata da problemi di rappresentatività del campione.

A tale proposito, occorre segnalare che l'APAT in collaborazione con l'Università degli Studi di Padova, ha sviluppato un modello, basato su dati inventariali, su scala regionale, per la stima del carbonio temporaneamente fissato negli ecosistemi forestali e il relativo *budget* annuale ([www.apat.it](http://www.apat.it)).

## 6. Cambiamenti climatici osservati in Europa

Il clima in Europa presenta notevoli differenze per la presenza a ovest della parte oceanica, a est di quella continentale, a nord dell'area artica e a sud del bacino del Mediterraneo. Gli effetti climatici della distribuzione di terra e mare sono poi ulteriormente complicati dalla presenza di numerose catene montuose che agiscono come vere e proprie barriere fisiche nella circolazione dell'atmosfera e spesso introducono ampi gradienti di precipitazioni in piccole regioni<sup>53</sup>. E' quindi estremamente difficile se non impossibile delineare un quadro sinottico del comportamento dell'atmosfera in un'area così eterogenea come l'Europa. L'Europa comunque possiede le più lunghe registrazioni strumentali di ogni parte del mondo, la maggiore delle quali si riferisce al XVIII e persino al XVII sec.<sup>54</sup>. La ricostruzione del clima di alcune regioni europee, utilizzando dei set di dati-guida, ha identificato la magnitudo della variabilità naturale della temperatura che si è verificata anche su una scala temporale di più secoli. Briffa *et al.*<sup>55</sup>, per esempio, hanno ricostruito 1400 anni di temperature estive dalla crescita degli alberi in Fennoscandia, nella parte più settentrionale dell'Europa; Pfister<sup>56</sup> ha ricostruito le temperature mensili di 460 anni e i regimi di precipitazione da evidenze idrologiche e biologiche osservate in Europa centrale mentre Fischer *et al.*<sup>57</sup> sono risaliti a 500 anni di temperature annuali dai ghiacciai della Groenlandia.

### 6.1 La temperatura

Gran parte dell'Europa ha sperimentato un aumento medio della temperatura dell'aria di superficie di 0,8°C rispetto alla media annuale<sup>58, 59, 60</sup>. Questo riscaldamento è stato più evidente sulla Russia nord occidentale e sulla Penisola Iberica<sup>61, 62</sup> e più evidente in inverno che in estate. Una eccezione è rappresentata dalla Fennoscandia (nome attribuito alla parte più settentrionale dell'Europa costituita dalle penisole della Scandinavia e di Kola, dalla Finlandia e da parte della Carelia), in cui si è registrato una diminuzione della temperatura media massima e minima in inverno e un aumento durante la primavera nell'arco temporale 1910-1995<sup>63</sup>. L'ultima decade (1990-99) in Europa è stata comun-

<sup>53</sup> Frei C., Schär C. A precipitation climatology of the Alps from high-resolution rain-gauge observations. *Int. J. Climatol.*, 18, 873-900, 1998.

<sup>54</sup> Camuffo D., Demarée G., Davies T.D., Jones P.D., Moberg A., Martin-Vide J., Cocheo C., Maugeri M., Thoen E. and Bergström H. Improved understanding of past climatic variability from early daily European instrumental source. *Proceedings of European Science conference*. Vienna. CEC, Brussels, October 1998.

<sup>55</sup> Briffa K.R., Jones P.D. and Hulme M. Summer moisture availability across Europe, 1892-1991: an analysis based on the Palmer Drought Severity Index. *Int. J. Climatol.*, 14, 475-506, 1994.

<sup>56</sup> Pfister C. Monthly temperature and precipitation patterns in Central Europe from 1525 to the present. A methodology for quantifying man made evidence on weather and climate. *Climate since 1500 A.D.* Routledge, London, 118-143, 1992.

<sup>57</sup> Fischer H., Werner M., Wagenbach D., Schwager M., Thorsteinsson T., Wilhelms F. and Kipfstuhl J. Little ice age clearly recorded in northern Greenland ice cores. *Geophys. Res. Letts.* 25, 1749-1752, 1998.

<sup>58</sup> KNMI, de Bilt. *Climate of Europe: recent variation, present state and future prospects*. European Climate Support Network, ECSN. The Netherlands, 1995.

<sup>59</sup> *Europe's Environment: The Second Assessment*. European Environment Agency EEA, Copenhagen, 1998.

<sup>60</sup> Beniston M. and Tol R.S.J. *The regional impacts of climate change: an assessment of vulnerability*. A special report of IPCC Working Group II. Cambridge University Press, Cambridge, 149-185, 1998.

<sup>61</sup> Nicholls N., Gruza G.V., Jouzel J., Karl T.R., Ogallo L.A. and Parker D.E. Observed climate variability and change. *Climate Change 1995*. The Science of Climate Change. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 133-192, 1996.

<sup>62</sup> Onate J.J. and Pou A. *Temperature variations in Spain since 1901: a preliminary analysis*. *Int. J. Climatol.*, 16, 805-815, 1996.

<sup>63</sup> Tuomenvirta H., Alexandersson H., Drebs A., Frich P. and Nordli P. Ø. Trends in Nordic and Arctic temperature extremes and ranges. *Int. J. Climatol.* 2000.

que la più calda tra quelle registrate in passato sia rispetto alle medie annuali che a quelle invernali.

Il riscaldamento dell'aria di superficie è inoltre strettamente correlato al riscaldamento superficiale del mare che durante il XX secolo è stato di diversi decimi di gradi Celsius interessando gran parte dell'Europa<sup>64</sup>

Un altro dato relativo ai cambiamenti climatici in atto è costituito dall'allungamento delle stagioni di crescita vegetativa registrato in Europa nella Russia occidentale<sup>65</sup> e nella regione della Fennoscandia<sup>66</sup>. Gli andamenti relativi all'intensità delle stagioni di crescita, cioè al numero di giorni con temperature crescenti, sono però in entrambi gli studi più ambigui rispetto ai dati relativi all'allungamento. Questa seconda tendenza trova, tra l'altro, supporto anche in altri studi<sup>67</sup> in cui vengono illustrati alcuni dati fenologici raccolti lungo larga parte dell'Europa centrale e in cui viene evidenziato un allungamento della stagione vegetativa di 10 giorni a partire dagli anni '60. Ulteriori studi<sup>68, 69</sup> descrivono inoltre cambiamenti in alcuni indicatori biologici quali lo spostamento di areale di alcune specie di farfalle e l'anticipo sulla stagione riproduttiva di diverse specie di anfibi e uccelli migratori registrati negli ultimi decenni. L'innalzamento delle temperature medie annuali è stato un risultato dell'incremento delle temperature notturne più che di quelle diurne<sup>70, 71</sup>, così come registrato anche in altre parti del mondo.

## 6.2 Le precipitazioni e gli eventi estremi

I regimi pluviometrici differiscono fortemente tra il nord Europa, generalmente più umido, e il sud Europa, notoriamente più secco. Questa differenza riflette una ancor più ampia gamma di *trend* zionali osservati nelle precipitazioni medie, che contrastano fortemente tra le alte e le basse latitudini<sup>72, 73</sup>. Le precipitazioni sul nord Europa sono aumentate dal 10 al 40% nel corso del secolo scorso mentre alcune zone del sud Europa hanno registrato un decremento delle precipitazioni fino al 20 % (Figura 6).

Un'analisi delle precipitazioni sull'Europa con l'utilizzo dell'indice di siccità di Palmer, *Palmer Drought Severity Index* (PDSI)<sup>55</sup>, ha mostrato una grossa variabilità su scala temporale di dieci anni nella frequenza degli eventi siccitosi con periodi particolarmente secchi negli anni '40 e primi anni '50 e un ripetersi del fenomeno tra il 1989 e il 1990.

Per quel che concerne gli eventi estremi, l'esistenza di studi di settore condotti in ambito nazionale ha reso difficile la visione d'insieme, a livello europeo, dei cambiamenti di frequenza dei giorni caldi/freddi, dell'intensità delle precipitazioni o delle frequenze delle tempeste. Secondo Gruza, che ha analizzato i dati climatici dell'intera Russia, un terzo della quale, nella sua propaggine più occidentale, cade in territorio europeo, nel corso del secolo scorso si è

<sup>55</sup> Briffa K.R., Jones P.D. and Hulme M. Summer moisture availability across Europe, 1892-1991: an analysis based on the Palmer Drought Severity Index. *Int. J. Climatol.*, 14, 475-506, 1994.

<sup>64</sup> Cane M.A., Clement A.C., Kaplan A., Kushnir Y., Pozdnyakov D., Seager R., Zebiak S.E. and Murtugudde R. Twentieth-century sea surface temperature trends. *Science*, 275, 957-960, 1997.

<sup>65</sup> Jones P.D. and Briffa K.R. Growing season temperatures over the former Soviet Union. *Int. J. Climatol.*, 15, 943-960, 1995.

<sup>66</sup> Carter T.R. Changes in the thermal growing season in Nordic countries during the past century and prospects for the future. *Agricultural and Food Science in Finland*, 7, 161-179, 1998.

<sup>67</sup> Menzel A. and Fabian P. Growing season extended in Europe. *Nature*, 397, 659, 1999.

<sup>68</sup> Parmesan C., Ryrholm N., Stefanescu C., Hill J.K., Thomas C.D., Descimon H., Huntley B., Kaila L., Kullberg J., Tammaru T., Tennent J., Thomas J.A. and Warren M. Poleward shifts in geographical ranges of butterfly species associated with regional warming. *Nature*, 399, 579-583, 1999.

<sup>69</sup> Forchhammer M.C., Post E. and Stenseth N.C. Breeding phenology and climate. *Nature*, 391, 29-30, 1997.

<sup>70</sup> Brazdil R., Budikova M., Auer I., Böhm R., Cegnar T., Fasko P., Lapin M., Gajic-Capka M., Zaninovic K., Koleva E., Niedzwiedz T., Szalai S., Ustrnul Z. and Weber R.O. Trends of maximum and minimum daily temperatures in central and southeastern Europe. *Int. J. Climatol.*, 16, 765-782, 1996.

<sup>71</sup> Easterling D.R., Horton B., Jones P.D., Peterson T.C., Karl T.R., Parker D.E., Salinger M.J., Razuvajev V., Plummer V., Jameson P. and Folland C.K. Maximum and minimum temperature trends for the globe. *Science*, 277, 364-367, 1997.

<sup>72</sup> Dai A., Fung I.Y. and Del Genio A.D. Surface observed global land precipitation variations during 1900-1988. *J. Climate*, 10, 2943-2962, 1997.

<sup>73</sup> Hulme M., Osborn T.J. and Johns T.C. Precipitation sensitivity to global warming: comparison of observations with HadCM2 simulations. *Geophys. Res. Letts.*, 25, 3379-3382, 1998.

verificato un incremento dell'Indice degli Eventi Climatici Estremi, il *Climate Extremes Index* (CEI), un indice che combina la temperatura giornaliera e la siccità estrema. Nella parte occidentale della Norvegia le ultime due decadi sono risultate eccezionali con aumento delle precipitazioni orografiche durante l'autunno, l'inverno e la primavera. Altrove, nel Regno Unito, l'intensità delle precipitazioni invernali giornaliere è aumentata nel corso delle ultime decadi, anche se non in tutte le stagioni. Parallelamente a questo incremento dell'intensità delle precipitazioni si è verificato un marcato decremento nella frequenza dei freddi giorni invernali e un incremento delle calde giornate estive, sebbene questo secondo aspetto sia legato in particolare ad alcuni anni e non a periodi più lunghi.

I cambiamenti nel verificarsi delle tempeste nel nord-est Atlantico, studiati da Schmit e Wasa, mostrano che sebbene la frequenza di questi fenomeni sia aumentata nelle ultime decadi, la loro intensità non è superiore a quella registrata precedentemente.

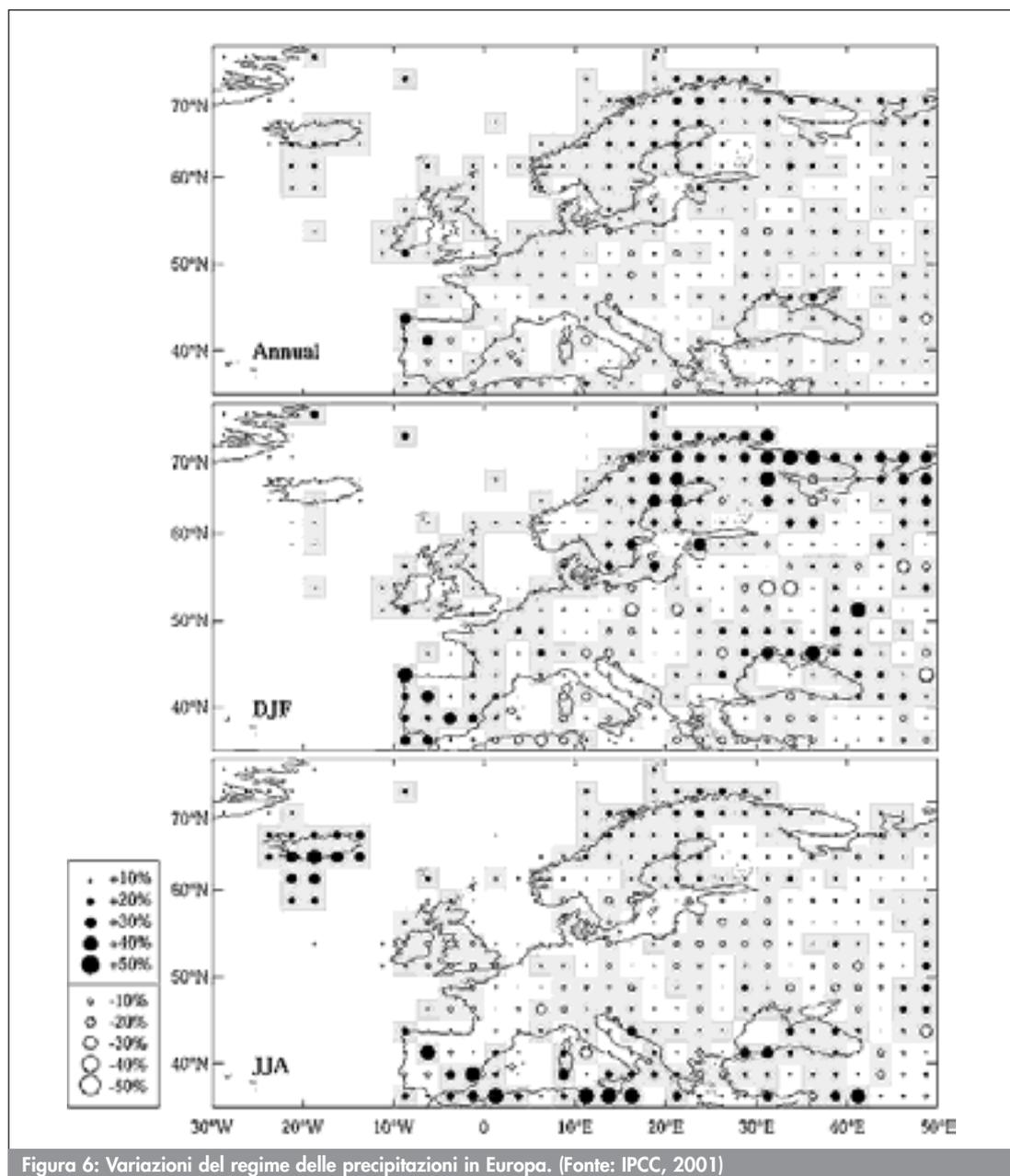


Figura 6: Variazioni del regime delle precipitazioni in Europa. (Fonte: IPCC, 2001)



## 7. Gli effetti dei cambiamenti climatici nel mediterraneo

### 7.1 Il settore agricolo

Molti e di diversa natura (economici, culturali, politici, tecnologici e ambientali) sono i fattori che influenzano le produzioni agricole in Europa e tra questi, quelli climatici. L'agricoltura è particolarmente vulnerabile a condizioni climatiche non favorevoli in quelle aree dove le coltivazioni sono limitate dalle temperature (nord Europa), dalla scarsa disponibilità d'acqua (sud Europa) o dalle abbondanti precipitazioni (costa Atlantica). Questi, difatti, sono i fattori climatici che determinano la produzione agricola, la temperatura, la radiazione solare incidente e le precipitazioni, che agiscono direttamente o attraverso gli effetti sui nutrienti e sul controllo di infestanti e malattie.

Il sistema produttivo agricolo è influenzato sia dai cambiamenti climatici sia direttamente dagli aumenti di concentrazione della CO<sub>2</sub>. Ci si attende per i prossimi decenni che il riscaldamento della Terra possa espandere verso nord le aree adatte ad uso agricolo, possa ridurre il periodo di crescita di alcune coltivazioni, in particolare di cereali, e possa aumentare la crescita di altre (per esempio i tuberi).

L'aumento della concentrazione di CO<sub>2</sub> produrrà direttamente un incremento della produttività e anche una migliore efficienza d'uso dell'acqua disponibile nei suoli, ma gli effetti saranno differenziati tra il nord e il sud dell'Europa.

Mentre infatti nel nord i cambiamenti climatici potrebbero avere degli effetti positivi sull'agricoltura attraverso l'introduzione di nuove specie e nuove varietà colturali, le maggiori produzioni agricole e l'espansione delle aree adatte alla coltivazione, sebbene con lo svantaggio di avere un'accelerazione della perdita di sostanza organica dei suoli, nell'area mediterranea i vantaggi saranno limitati a favore degli svantaggi. In particolare, l'aumentata efficienza d'uso dell'acqua da parte delle piante compenserà alcuni degli effetti negativi dell'incremento nella limitazione dell'acqua stessa. Inoltre, l'aumento di frequenza di alcuni eventi estremi potrà causare la diminuzione delle rese agricole, aumentarne la variabilità e ridurre l'estensione superficiale delle aree adatte ad uso agricolo. La ridotta disponibilità d'acqua potrà dipendere sia da precipitazioni più scarse, sia da maggiore evapotraspirazione e dalla ridotta disponibilità d'acqua d'irrigazione.

Le strategie di mitigazione dei cambiamenti climatici in questo settore possono essere distinte in strategie di breve termine e di lungo-termine. Le prime includono alcune pratiche agronomiche, quali la variazione delle specie colturali, delle date di semina e di raccolta, il cambio d'uso di alcuni *input*, quali fertilizzanti, pesticidi, regolatori della crescita, e l'introduzione di alcune pratiche per conservare l'umidità e per migliorare le tecniche d'irrigazione.

Le strategie di lungo-termine di adattamento ai cambiamenti climatici includono invece i cambi d'uso del suolo (per ottimizzare e stabilizzare le produzioni) lo sviluppo di alcune varietà colturali più adatte (con maggiore resistenza al calore, all'acqua, alle specie infestanti e agli *stress* indotti dalle malattie), la sostituzione dei raccolti (con l'introduzione di specie subtropicali e tropicali nelle regioni mediterranee, di mais e girasole nelle regioni del nord Europa e di cereali e ortaggi nelle regioni esterne della stessa zona), la modificazione del microclima, l'introduzione di sistemi d'irrigazione più efficienti e i cambiamenti nelle pratiche di gestione del settore agricolo e zootecnico.

### 7.2 Il settore forestale

Il settore forestale in Europa raggruppa fundamentalmente tre regioni forestali contraddistin-

te da diverse condizioni bioclimatiche<sup>74</sup>: la Boreale, nella parte settentrionale dell'Europa; la Temperata, a sua volta divisa in Atlantica e Continentale, con differente disponibilità d'acqua nel terreno (maggiore nel primo caso e inferiore nel secondo); e quella Mediterranea, caratteristica della zona semi-arida del bacino del Mediterraneo.

Secondo gli scenari sui cambiamenti climatici la zona delle foreste boreali sarà interessata da un incremento delle temperature e delle precipitazioni durante tutto l'anno e saranno particolarmente evidenti nella stagione invernale. La zona Atlantica invece potrebbe essere interessata da un incremento delle precipitazioni invernali, da una riduzione di quelle estive e da un aumento dei venti forti con velocità superiore ai 15 ms<sup>-1</sup>. Per quel che riguarda le foreste Continentali, si potrà verificare una maggiore incidenza dei fenomeni di siccità così come nelle foreste Mediterranee, anche se in questo secondo caso il fenomeno potrebbe essere molto più drastico. Nella zona Mediterranea potrebbe evidenziarsi la stagionalità delle precipitazioni con precipitazioni più abbondanti d'inverno e più scarse d'estate, estati molto calde e secche e frequenti incendi.

In questa sezione si farà il punto su quelli che sono i potenziali effetti dei cambiamenti climatici sulle foreste europee e, in particolare, su quelle dell'area mediterranea, con riferimento a quanto riportato nello studio europeo ACACIA<sup>74</sup>, finanziato dal Programma Ambiente della Commissione Europea e pubblicato nell'anno 2000.

### 7.2.1 Le risorse forestali in Europa

Secondo la relazione UN-ECE/FAO Forest Resource Assessment del 1992, l'area forestale totale dell'Europa è di 956 milioni di ha, di cui l'85% è Boreale, il 2% Atlantica, il 9% Continentale e il 4% è Mediterranea (Tabella 6).

Tabella 6: Principali caratteristiche delle foreste europee divise per regione

Regioni forestali bioclimatiche e Paesi che ne fanno parte	Esempi di specie di importanza forestale	Principali parametri forestali	
<b>Boreale</b> Finlandia, Svezia, Norvegia settentr., Federaz. Russa nord-occident.	<i>Pinus sylvestris</i> , <i>Picea abies</i> , <i>Betula pendula</i> , <i>Betula pubescens</i> , <i>Populus tremula</i> , <i>Pinus contorta</i> , <i>Larix sibirica</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Area, Mha</li> <li>• Percentuale sul totale europeo</li> <li>• Volume totale, Mm<sup>3</sup></li> </ul>	808 85% 55031
<b>Atlantica</b> Irlanda, Regno Unito, Belgio, Paesi Bassi, Francia occident., Danimarca	<i>Picea abies</i> , <i>Picea sitchensis</i> , <i>Pinus sylvestris</i> , <i>Pinus contorta</i> , <i>Quercus sp.</i> , <i>Larix sp.</i> , <i>Betula pendula</i> , <i>Fagus sylvatica</i> , <i>Fraxinus sp.</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Area, Mha</li> <li>• Percentuale sul totale europeo</li> <li>• Volume totale, Mm<sup>3</sup></li> </ul>	18 2% 2219
<b>Continentale</b> Federaz. Russa (esclusa la parte nord occident.), Biellorussia, Ucraina, Moldavia, Romania, Polonia, Ungheria, Repubblica Ceca, Svizzera	<i>Fagus sylvatica</i> <i>Picea Abies</i> , <i>Pinus sylvestris</i> , <i>Abies alba</i> , <i>Betula pendula</i> , <i>Quercus sp.</i> , <i>Fraxinus sp.</i> , <i>Anus glutinosa</i> , <i>Populus sp.</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Area, Mha</li> <li>• Percentuale sul totale europeo</li> <li>• Volume totale, Mm<sup>3</sup></li> </ul>	88 9% 9665

segue

segue

Regioni forestali bioclimatiche e Paesi che ne fanno parte	Esempi di specie di importanza forestale	Principali parametri forestali	
<b>Mediterranea</b>	<i>Quercus ilex</i> , <i>Pinus pinaster</i> , <i>Pinus halepensis</i> , <i>Pinus sylvestris</i> , <i>Pinus pinea</i> , <i>Eucalyptus sp.</i> , <i>Fagus sylvatica</i> , <i>Pinus nigra</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Area, Mha</li> <li>• Percentuale sul totale europeo</li> <li>• Volume totale, Mm<sup>3</sup></li> </ul>	<p>42</p> <p>4%</p> <p>3216</p>
Portogallo, Spagna, Francia merid., Italia, Grecia, ex-Yugoslavia, Bulgaria, Turchia			

Fonte: UNE-CE/FAO Forest Resource Assessment, 1992

Molte regioni forestali dell'Europa hanno subito nel tempo una intensa deforestazione per un cambio d'uso del suolo, particolarmente nell'area del centro, ovest e sud Europa e solo la parte settentrionale della Scandinavia, della Finlandia e del nord-ovest della Federazione Russa rimangono intensamente forestate. Di conseguenza, la composizione corrente di specie forestali deriva più dall'uso del territorio e dalla gestione che l'uomo ha condotto in passato più che da fattori naturali, eccetto che per il nord Europa dove le specie naturali hanno un ruolo predominante nelle foreste.

La variabilità genetica intra e inter-specifica delle specie forestali, è grande abbastanza per consentire alle specie di adattarsi ai cambiamenti medi delle temperature e delle precipitazioni ma è l'aumento della frequenza e ampiezza dei fenomeni estremi, quali siccità, vento e gelate primaverili ed estive, a costituire una potenziale minaccia<sup>75</sup>.

Recentemente c'è la tendenza a preferire specie arboree naturali con un approccio più ecologico alla gestione forestale<sup>76</sup>. Questo potrebbe condurre nel lungo tempo ad un variazione nella composizione di specie arboree, in modo da portare ad un migliore adattamento alle condizioni climatiche ed edafiche prevalenti in Europa. Quindi, le future comunità forestali potrebbero molto probabilmente essere composte in modo differente dall'attuale<sup>77</sup>.

### 7.2.2 Effetti sulla foresta mediterranea

Gli impatti più significativi sulle foreste mediterranee è probabile che derivino da variazioni nella disponibilità d'acqua. Gli incrementi della temperatura e, in particolare, la riduzione del verificarsi delle gelate potrebbero influenzare l'espansione di alcune specie arboree, quali *Quercus pyrenaica* e *Quercus rotundifolia*, lì dove l'acqua non fosse un fattore limitante.

Variazioni nelle precipitazioni stabiliranno l'importanza relativa delle specie sclerofille e delle decidue e, in particolare, sarà importante la disponibilità d'acqua nel periodo tra aprile e giugno<sup>78</sup>. Nella regione dei Pirenei è probabile che con l'innalzamento delle temperature e con un clima secco si possa avere uno spostamento verso nord e verso latitudini maggiori degli ecotipi mediterranei.

Uno dei problemi principali dell'area mediterranea è legato alla scarsità d'acqua, soprattutto nei periodi estivi, che in concomitanza con alte temperature potrebbe condurre nel tempo all'incremento del numero di incendi. In Europa, 660.000 diversi incendi divampati tra il 1980 e il 1993 hanno interessato un'area di quasi 8 milioni di ettari. Esiste una differenza significativa nella entità e frequenza degli incendi in relazione alla precisa locazione geografica. In Spagna, per es., in un singolo anno (1990) gli incendi hanno bruciato più di 2 milioni di ettari di terreno. Anche in Italia, Portogallo, Grecia e le zone mediterranee della Francia gli incendi forestali costituiscono un serio problema.

<sup>77</sup> Lindner M., Bugmann H., Lasch P., Flechsig M. and Cramer W. Regional impacts of climatic change on forests in the state of Brandenburg, Germany. *Agricultural and Forest Meteorology*, 84 (12) 123-135, 1997.

<sup>78</sup> Gavilan R. and Fernandez González E. Climatic discrimination of Mediterranean broadleaved sclerophyllous and deciduous forests in central Spain. *Journal of Vegetation Science* 8, 377-386, 1997.

In relazione alla entità e frequenza degli episodi di siccità, la diminuzione delle precipitazioni estive può avere un drastico effetto sulla crescita delle foreste sull'intera area e su tutte le specie. Le specie arboree presenti nella zona più a nord, principalmente *Pinus sylvestris* e *Fagus sylvatica*, sono potenzialmente le più vulnerabili all'impatto dei cambiamenti delle temperature e delle precipitazioni rispetto a quelle specie, quali *Pinus pinaster* e le specie del genere *Quercus*, che sono invece presenti nella parte meridionale di questa regione bioclimatica.

## 8. Conclusioni

Come evidenziato nei capitoli precedenti, le relazioni tra gli ecosistemi vegetali e i cambiamenti climatici in atto sono estremamente complesse, ancora dense d'incertezze e carenze conoscitive, sia per gli aspetti relativi alla risposta e agli impatti dei cambiamenti climatici sulla vegetazione sia per il ruolo che quest'ultima può avere nella mitigazione dei primi.

Su scala globale, la fertilizzazione carbonica, l'aumento della temperatura e le condizioni climatiche più favorevoli produrranno sicuramente effetti disuguali su scala regionale e locale. A livello globale, i cambiamenti climatici che influenzeranno maggiormente la crescita delle foreste saranno l'innalzamento della temperatura, alle alte latitudini, e i cambiamenti nelle precipitazioni alle basse latitudini. Effetti positivi sono attesi sugli ecosistemi vegetali delle regioni boreali (Canada, Scandinavia, Siberia), dove si allungherà la stagione vegetativa e il terreno metterà a disposizione una maggiore quantità di nutrienti derivanti dalla decomposizione della sostanza organica. Effetti negativi invece si prevedono per le regioni temperato-secche, tropicali e sub-tropicali, dove la produttività e l'estensione della vegetazione si ridurranno notevolmente a causa dell'aumento della temperatura e, soprattutto, della riduzione delle precipitazioni.

Nel nostro paese, un primo effetto dell'aumento della temperatura (peraltro già osservato) potrà essere un accrescimento dell'evaporazione dai suoli e della traspirazione dalle piante. Se combiniamo ciò alla riduzione delle precipitazioni, che secondo gli scenari potrebbero diminuire dal 10 al 25%, è facile attendersi una maggiore frequenza e una maggiore durata dei periodi di siccità. Uno scenario che potrebbe risultare critico per molte colture (si pensi all'olivo, alla vite e ai cereali) di molte aree interessate già dal processo di desertificazione. I danni sulle foreste potrebbero essere ancora maggiori, per via dell'interazione della siccità con l'inquinamento (anche da ozono) e i parassiti. Gli stessi incendi, pur di natura dolosa, saranno fatalmente favoriti, nell'intensità e nelle dimensioni, dal peggioramento delle condizioni climatiche.

Anche il paesaggio, potrebbe essere interessato da un cambiamento. Alcuni studiosi prevedono un abbandono delle colture cerealicole in molte zone collinari della penisola. Queste, secondo un processo già percepibile su molti terreni agricoli abbandonati dai proprietari, potrebbero essere invase da vegetazione arbustiva e arborea forestale. Naturalmente, le specie più aggressive saranno favorite, tra cui la robinia, per via della facilità di propagazione e della plasticità di questa specie. Oppure, si potrebbero insidiare nuove coltivazioni, quali agrumi, olivo, vite, tabacco, che potrebbero migrare verso quote più elevate e verso nord, per trovare condizioni più favorevoli al clima che cambia. La minore disponibilità di acqua, che potrà essere solo in parte e nel breve periodo compensata dal prelievo di acqua sotterranea, produrrà un abbandono progressivo, specialmente nel sud della penisola, delle colture a ciclo primaverile-estivo.

In questo senso, è richiesto un grande sforzo da parte delle autorità responsabili delle politiche agricole e della comunità scientifica, ridurre le incertezze sugli scenari dei cambiamenti climatici e dei loro effetti; limitatamente al settore agricolo dovranno riguardare, per esempio, alcune pratiche agronomiche (uso di nuove varietà, di varietà locali, spostamento delle date di semina e raccolta), l'uso più razionale di fertilizzanti, pesticidi, regolatori della crescita, l'introduzione di nuovi sistemi di gestione delle risorse idriche. Nel lungo periodo, potrebbe essere necessaria una gestione diversa che comporti dei cambiamenti d'uso del suolo per ottimizzare o stabilizzare le produzioni agricole, la sostituzione di colture, la modificazione delle condizioni micro-climatiche, l'uso di sistemi d'irrigazione più efficienti e la trasformazione, in genere, della gestione del settore agricolo (agro-selvicoltura e sistemi agricoli misti invece che specializzati).

Per quanto riguarda gli impatti sugli ecosistemi forestali, la variabilità degli ecosistemi, delle specie e la diversità genetica delle nostre foreste è probabilmente abbastanza vasta da consentire loro di acclimatarsi alle variazioni attese di temperatura e di piovosità. Problemi, però, per la conservazione delle superfici forestali, per la loro vitalità e produttività, per la conservazione della biodiversità potranno aversi se la magnitudine e la frequenza dei fenomeni siccitosi saranno davvero elevati.

Alcune specie si avvantaggeranno a spese di altre; le specie quercine a scapito di frassini e carpini, le specie caducifoglie a scapito delle sempreverdi; alcune specie tipicamente associate alla presenza di corsi d'acqua, quali salici e pioppi, sarebbero le prime ad essere minacciate. I rischi maggiori riguardano la vegetazione costiera, per le quali elevata è la minaccia del previsto innalzamento del livello del mare, che si aggiunge ad altre pressioni antropiche, quali la pressione turistica e l'abusivismo edilizio.

Per quanto riguarda il potenziale contributo degli ecosistemi vegetali alla mitigazione dei cambiamenti climatici, occorre rilevare che questa è in funzione di una serie di variabili che è difficile prevedere. Alcuni studi di recente pubblicazione affermano che le foreste possono "sequestrare" fino a 1-1,5 miliardi di tonnellate l'anno. Ma questo contributo potrebbe essere anche maggiore se si considera l'apporto energetico delle biomasse legnose in sostituzione delle fonti fossili d'energia.

L'attività di negoziazione relativa alle modalità di applicazione del Protocollo di Kyoto presenta degli elementi di interesse non solo per le conseguenze economiche che potranno determinarsi sul settore forestale, ma anche per l'analisi della complessità dei problemi che si pongono quando si avviano iniziative volte a modificare le regole di funzionamento del libero mercato.

Al di là degli esiti scaturiti dal processo di negoziazione sull'uso dei suoli agricoli e delle foreste nell'ambito dell'UNFCCC (esiti che non sembrano sempre andare incontro alle esigenze di riconoscere un valore economico alle risorse forestali del nostro paese), è interessante evidenziare che la discussione in corso ha permesso di rendere esplicito il valore del servizio di stabilizzazione climatica connesso alla conservazione e corretta gestione delle foreste. Infatti, l'oggetto del dibattito non è stato (e non sarà) il riconoscimento in linea generale che la presenza di risorse forestali in fase di recupero provvisoria, i fenomeni di ricolonizzazione naturale di ex-coltivi, l'arboricoltura da legno, la riduzione degli incendi – solo per ricordare alcuni temi di grande attualità per il nostro paese – non comportino evidenti benefici di stabilizzazione climatica, quanto il fatto che il conteggio esatto di tali benefici sia complesso e inficiato da assunzioni deboli e facilmente contestabili. Per tali ragioni, oltre che per la condivisibile necessità di promuovere prioritariamente misure di risparmio e di razionalizzazione dei consumi energetici, sembra che alcune tipologie di intervento nel settore forestale non potranno essere incluse negli interventi in applicazione del Protocollo di Kyoto.

Può essere questo uno stimolo utile a riflettere sull'opportunità di sviluppare sistemi di raccolta sistematica di dati sull'evoluzione del settore, ma anche per trovare nuovi strumenti di promozione degli investimenti nei settori agricolo e forestale, sempre collegati alla funzione di stabilizzazione climatica dei suoli agricoli e delle foreste – quali quelli connessi all'impiego della *carbon tax*, all'utilizzo delle biomasse a fini energetici, alla realizzazione di investimenti compensativi da parte di imprese che fanno largo uso di energie fossili. Su questi temi al mondo agricolo e forestale si richiede un salto di qualità nelle capacità di indagine, di comunicazione e di promozione delle diverse possibilità di investimento.

## 9. Bibliografia

Albritton D.L. and Meira Filho L.G. Technical Summary. In: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, UK, 21-83, 2001.

Alexandratos N. (ed.). World Agriculture: Towards 2010. An FAO Study. John Wiley and Sons, Chichester, United Kingdom, 488 p., 1995.

Amthor J.S. Plant respiratory responses to elevated carbon dioxide partial pressure. *Advance in Carbon Dioxide Research*, 61, 35-77, 1997.

Beniston M. and Tol R.S.J. The regional impacts of climate change: an assessment of vulnerability. A special report of IPCC Working Group II. Cambridge University Press, Cambridge, 149-185, 1998.

Bowes G., Vu J.C.V., Hussain M.W., Pennanen A.H. and Allen L.H. Jr. An overview of how rubisco and carbohydrate metabolism may be regulated at elevated atmospheric CO<sub>2</sub> and temperature. *Agricultural and Food Science in Finland*, 5, 261-270, 1996.

Bradley N.L., Leopold A.C., Ross J. and Huffaker W. Phenological changes reflect climate change in Wisconsin. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 96, 9701-9704, 1999.

Brazdil R., Budikova M., Auer I., Böhm R., Cegnar T., Fasko P., Lapin M., Gajic-Capka M., Zaninovic K., Koleva E., Niedzwiedz T., Szalai S., Ustrnul Z. and Weber R.O. Trends of maximum and minimum daily temperatures in central and southeastern Europe. *Int. J. Climatol.*, 16, 765-782, 1996.

Briffa K.R., Jones P.D. and Hulme M. Summer moisture availability across Europe, 1892-1991: an analysis based on the Palmer Drought Severity Index. *Int. J. Climatol.*, 14, 475-506, 1994.

Brown S., Sathaye J., Cannel M. and Kauppi P. Management of forests for mitigation of greenhouse gas emissions. In: *Climate Change 1995, impacts, adaptations and mitigation of climate change: Scientific-Technical Analyses. Report of Working Group II, IPCC*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 773-797, 1995.

Camuffo D., Demarée G., Davies T.D., Jones P.D., Moberg A., Martin-Vide J., Cocheo C., Maugeri M., Thoen E. and Bergström H. Improved understanding of past climatic variability from early daily European instrumental source. *Proceedings of European Science conference. Vienna. CEC, Brussels, October 1998.*

Cane M.A., Clement A.C., Kaplan A., Kushnir Y., Pozdnyakov D., Seager R., Zebiak S.E. and Murtugudde R. Twentieth-century sea surface temperature trends. *Science*, 275, 957-960, 1997.

Carter T.R. Changes in the thermal growing season in Nordic countries during the past century and prospects for the future. *Agricultural and Food Science in Finland*, 7, 161-179, 1998.

- Casella E., Sousanna J.F. and Loiseau P. Long term effects of CO<sub>2</sub> enrichment and temperature increase on a temperate grass sward. In: Productivity and water use. *Plant and Soil*, 182, 83-99, 1996.
- CCIRG UK Climate Change Impacts Review Group. Review of the Potential Effects of Climate Change in the United Kingdom. Department of the Environment. HMSO, London, 1996.
- Climate change and forests. In: State of the World's Forests 2001. FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations-, 60-73, 2001.
- Cole C.V., Duxbury J., Freney J., Heinemeyer O., Minami K., Mosier A., Paustian K., Rosenberg N., Sampson N., Sauerbeck D. and Zhao Q. Agricultural options for mitigation of greenhouse gas emissions. In: Climate Change 1995: Impacts, Adaptations and Mitigation of climate change: Scientific-Technical Analyses. Report of Working Group II, IPCC, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 745-771, 1995.
- Corona P. Sustainable management of forests for atmospheric CO<sub>2</sub> depletion: the Italian case. *Journal of Sustainable Forestry* (3/4): 81-97, 1997.
- D.M Etheridge, L.P. Steele, R.J. Francey and R.L. Langenfelds. Atmospheric methane between 1000 A.D. and present: Evidence of anthropogenic emissions and climate variability. *Journal of Geophysical Research*, 103, 15.979-15.993, 1998.
- Dai A., Fung I.Y. and Del Genio A.D. Surface observed global land precipitation variations during 1900-1988. *J. Climate*, 10, 2943-2962, 1997.
- Dixon R.K., Brown S., Houghton R.A., Solomon A.M., Trexler M.C. and Wisniewski J. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, 263, 185-190, 1994.
- Drake B.G., Gonzales-Meler M.A. and Long S.P. More efficient plants: a consequence of rising atmospheric CO<sub>2</sub>. *Annual Review of Plants Physiology and Plant Molecular Biology*, 48, 607-637, 1997.
- Dugas W.A., Heuer M.L., Hunsaker D., Kimball B.A., Lewin K.F., Nagy J. and Johnson M. Sap flow measurements of transpiration from cotton grown under ambient and enriched CO<sub>2</sub> concentrations. *Agricultural and Forest Meteorology*, 70, 231-245, 1994.
- Dukes J.S. and H.A. Mooney. Does global change increase the success of biological invaders? *Trends in Ecology and Evolution*, 14, 135-139, 1999.
- Easterling D.R., Horton B., Jones P.D., Peterson T.C., Karl T.R., Parker D.E., Salinger M.J., Razuvajev V., Plummer V., Jameson P. and Folland C.K. Maximum and minimum temperature trends for the globe. *Science*, 277, 364-367, 1997.
- Europe's Environment: The Second Assessment. European Environment Agency EEA, Copenhagen, 1998.
- FAO, *State of the World's Forests*, 180 p., Rome, 2001.
- FAO. *State of the World's Forests, 1999. Rome, 2000.*
- Fearnside P.M. Global warming and tropical land-use change: greenhouse gas emissions from biomass burning, decomposition and soils in forest conversion, shifting cultivation and secondary vegetation. *Climatic change*, 46, 115-158, 2000.
- Fischer H., Werner M., Wagenbach D., Schwager M., Thorsteinsson T., Wilhelms F and Kipf-

stuhl J. Little ice age clearly recorded in northern Greenland ice cores. *Geophys. Res. Letts.* 25, 1749-1752, 1998.

Forchhammer M.C., Post E. and Stenseth N.C. Breeding phenology and climate. *Nature*, 391, 29-30, 1997.

Frei C., Schär C. A precipitation climatology of the Alps from high-resolution rain-gauge observations. *Int. J. Climatol.*, 18, 873-900, 1998.

Gavilan R. and Fernandez González E. Climatic discrimination of Mediterranean broadleaved sclerophyllous and deciduous forests in central Spain. *Journal of Vegetation Science*, 8, 377-386, 1997.

Grainger, A. Constraints on modelling the deforestation and degradation of tropical open woodlands. *Global Ecology and Biogeography* 8 (3/4): 179-190, 1999.

Güllük T., Slemr F. and Stauffer B. Simultaneous measurements of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and N<sub>2</sub>O in air extracted by sublimation from Antarctica ice cores: Confirmation of the data obtained using other extraction techniques. *Journal of Geophysical Research*, 103, 15.971-15.978. 978, 1998.

Heywood V.H. and Watson R.T. *Global Biodiversity Assessment*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1152 pp, 1996.

Horie T., Baker J.T., Nakagawa H. and Matsui T.. Crop ecosystems responses to climatic change: rice. In: *Climate Change and Global Crop Productivity*. CAB International, Wallingford, United Kingdom, 81-106, 2000.

Houghton R.A. Converting terrestrial ecosystems from sources to sinks of carbon. *Ambio*, 25 (4), 267-272, 1996.

Houghton R.A. The annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use, 1850-1990. *Tellus Series B - Chemical and Physical meteorology*, 51 (2), 298-313.

Hulme M., Osborn T.J. and Johns T.C. Precipitation sensitivity to global warming: comparison of observations with HadCM2 simulations. *Geophys. Res. Letts.*, 25, 3379-3382, 1998.

IEA Bioenergy - *International Energy Agency* ([www.ipoanneum.at/iea-bioenergy-task38](http://www.ipoanneum.at/iea-bioenergy-task38)).

IPCC. Land Use, Land-use Change, and Forestry. R.T. Watson, I.R. Noble, B. Bolin, N.H. Ravindranath, D.J. Verardo and D.J. Dokken (eds.). A Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, United Kingdom and New York, USA. 377 p., 2001.

IPCC First Assessment Report. 1990 -three volumes-

- J.T. Houghton, G.J. Jenkins and J.J. Ephraums (Eds). *Scientific Assessment of Climate change*. Report of Working Group I. Cambridge University Press, UK.

- W.J. McG. Tegart, G.W. Sheldon, D.C. Griffiths (Eds). *Impacts Assessment of Climate Change*. Report of Working Group II. Australian Government Publishing Service, Australia.

-*The IPCC Response Strategies*. Report of Working Group III. Island Press, USA.

Jones P.D. and Briffa K.R. Growing season temperatures over the former Soviet Union. *Int. J. Climatol.*, 15, 943-960, 1995.

IPCC Second Assessment Report: *Climate Change 1995 (SAR)* -three volumes-

- J.T. Houghton, L.G. Meira Filho, B.A. Callender, N. Harris, A. Kattenberg and K. Maskell (Eds). *The Science of Climate Change*. Contribution of Working Group I to the Second Assessment of the In-

- tergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, UK.
- R.T. Watson, M.C. Zinyowera, R.H. Moss (Eds). *Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analyses*. Contribution of Working Group II to the Second Assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change.. Cambridge University Press, UK.
- J.P. Bruce, H. Lee, E.F. Haites (Eds). *Economic and Social Dimensions of Climate Change*. Contribution of Working Group III to the Second Assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, UK.
- IPCC Third Assessment Report: *Climate Change 2001 (TAR)* -three volumes-. Cambridge University Press, UK.
- J. T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P. J. van der Linden and D. Xiaosu (Eds.). *The Scientific Basis*. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, UK, 2001.
- J. J. McCarthy, O. F. Canziani, N. A. Leary, D. J. Dokken and K. S. White (Eds.). *Impacts, Adaptation & Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, UK, 2001.
- B. Metz, O. Davidson, R. Swart and J. Pan (Eds.). *Mitigation*. Contribution of Working Group III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, UK, 2001.
- Kauppi P. and Sedjo R. Technological and Economic Potential of Options to Enhance, Maintain, and Manage Biological Carbon Reservoirs and Geo-engineering. In: *Climate Change 2001: Mitigation*. Contribution of Working Group III to the Third Assessment Report of The IPCC. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 302-343, 2001.
- Keeling C.D., Chin J.F.S. and Whorf T.P. Increased activity of northern vegetation inferred from atmospheric CO<sub>2</sub> measurements. *Nature*, 382, 146-149, 1996.
- Kienast F., Wildi O. and Brzeziecki B. Potential impacts of climate change on species richness in mountain forests: an ecological risk assessment. *Biological Conservation*. 83, 291-305, 1998.
- Kimball B.A., LaMorte R.L., Pinter J., Pinter P.J., Wall G.W., Hunsaker D.J., Adamsen F.J., Leavitt S.W., Thompson T.L., Matthias A.D. and Brooks T.J. Free-air CO<sub>2</sub> enrichment and soil nitrogen effects on energy balance and evapotranspiration of wheat. *Water Resources Research*, 35, 1179-1190, 1999.
- Kimball B.A., Pinter P.J. Jr., Garcia R.L., LaMorte R.L., Wall G.W., Hunsaker D.J., Wechsung G., Wechsung F. and Karschall T. Productivity and water use of wheat under free-air CO<sub>2</sub> enrichment. *Global Change Biology*, 1, 429-442, 1995.
- KNMI, de Bilt. *Climate of Europe: recent variation, present state and future prospects*. European Climate Support Network, ECSN. The Netherlands, 1995.
- Lal R. and Bruce J.P. The potential of world cropland soils to sequester C and mitigate the greenhouse effect. *Environmental Science and Policy*, 2, 177-185, 1999.
- Lämås T. and Fries C. Emergence of a biodiversity concept in Swedish forest policy. *Water, Air and Soil Pollution*, 82, 57-66, 1995.
- Lindner M., Bugmann H., Lasch P., Flechsig M. and Cramer W. Regional impacts of climatic change on forests in the state of Brandenburg, Germany. *Agricultural and Forest Meteorology*, 84 (12), 123-135, 1997.
- Malhi Y., Baldocchi D.D. and Jarvis P.G. The carbon balance of tropical, temperate and boreal

forests. *Plant, Cell and the Environment*, 22, 715-740.

Mauney J.R., Kimball B.A., Pinter P.J., Lamorte R.L., Lewin K.F., Nagy J. and Hendrey G.R. Growth and yield of cotton in response to a free-air carbon dioxide enrichment (FACE) environment. *Agricultural and Forest Meteorology*, 70, 49-67, 1994.

Menzel A. and Fabian P. Growing season extended in Europe. *Nature*, 397, 659, 1999.

Metz B., Davidson O., Swart R. and Pan J. (Eds.). IPCC Third Assessment Report: Climate Change 2001 (TAR). Impacts, Adaptation & Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) - Cambridge University Press, UK, 2001.

Mitchell R.A.C., Mitchell V.J., Driscoll S.P., Franklin J. and Lawlor D.W.. Effects of increased CO<sub>2</sub> concentration and temperature on growth and yield of winter wheat at 2 levels of nitrogen application. *Plant Cell Environment*, 16, 521-529, 1993.

Moura-Costa P. The climate convention and evolution of the market for forest carbon offsets. *U-nasylva*, 52 (206): 34-41, 2001.

Myneni R.B., Keeling C.D., Tucker C.J., Asrar G. and Nemani R.R. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981-1991. *Nature*, 386, 698-702, 1997.

Nicholls N., Gruza G.V., Jouzel J., Karl T.R., Ogallo L.A. and Parker D.E. Observed climate variability and change. *Climate Change 1995. The Science of Climate Change. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press, 133-192, 1996.

NOAA -National Oceanic and Atmospheric Administration- ([www.noaa.gov](http://www.noaa.gov)).

Oldeman R.L., Hakkeling T.A. and Sombroek W.G. World Map of the Status of Human-Induced Soil Degradation, 2nd Rev. Ed. International Soil Reference and Information Centre, Wageningen, The Netherlands, 1991.

Onate J.J. and Pou A. Temperature variations in Spain since 1901: a preliminary analysis. *Int. J. Climatol.*, 16, 805-815, 1996.

Parmesan C., Ryrholm N., Stefanescu C., Hill J.K., Thomas C.D., Descimon H., Huntley B., Kaila L., Kullberg J., Tammaru T., Tennent J., Thomas J.A. and Warren M. Poleward shifts in geographical ranges of butterfly species associated with regional warming. *Nature*, 399, 579-583, 1999.

Parry M., Fischer C., Livermore M., Rosenzweig C. and Iglesias A. Climate change and world food security: a new assessment. *Global Environmental Change*, 9, S51-S67, 1999.

Parry M.L. (Editor). Assessment of Potential Effect and Adaptations for Climate Change in Europe: The Europe ACACIA Project. Jackson Environment Institute, University of East Anglia, Norwich, UK, 320 pp, 2000.

Pfister C. Monthly temperature and precipitation patterns in Central Europe from 1525 to the present. A methodology for quantifying man made evidence on weather and climate. *Climate since 1500 A.D.* Routledge, London, 118-143, 1992.

Pinard M.A., Putz, F.E., Tay, J. & Sullivan, T.E.. Creating timber harvest guidelines for a reduced-impact logging project in Malaysia. *J. For.*, 93 (10): 41-45, 1995.

Pinter P.J. Jr., Kimball B.A., Garcia R.L., Wall G.W., Hunsaker D.J. and LaMorte R.L. Free-air CO<sub>2</sub> enrichment: responses of cotton and wheat crops. In: Carbon Dioxide and Terrestrial Ecosystems. Academic Press, San Diego, CA, USA, 215-249, 1996.

Reilly, J. Agriculture in a changing climate: impacts and adaptation. In: Climate Change 1995. Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change. Scientific-Technical Analyses. Contribution of Working Group II to the Second Assessment Report of The IPCC. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 429-467, 1995.

Rosenzweig C. and Iglesias A. The use of crop models for international climate change impact assessment. In: Understanding Options for Agriculture Production. J. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, pp. 267-292, 1998.

Sala O.E., Chapin F.S. III, Armesto J.J., Berlow E., Bloomfield J., Dirzo R., Huber-Sanwald E., Huenneke L.F., Jackson R.B., Kinzig A., Leemans R., Lodge D.M., Mooney H.A., Oesterheld M., Poff N.L., Sykes M.T., Walker B.H., Walker M. and Wall D.H.. Biodiversity: global biodiversity scenarios for the year 2100. *Science*, 287, 1770-1774, 2000.

Sampson R.N., Scholes R.J., Cerri C., Erda L., Hall D.O., Handa M., Hill P., Howden M., Janzen H., Kimble J., Lal R., Marland G., Minami K., Paustian K., Read P., Sanchez P.A., Scoppa C., Solberg B., Trossero M.A., Trumbore S., Cleemput O. Van, Whitmore A. and Xu D. Additional Human-induced Activities- art. 3.4. In: Land Use, Land-use Change and Forestry. A Special Report of the IPCC, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 377 pp., 2000.

Scherr S.J. and Yadav S. Land Degradation in the Developing World: Issues and Policy Options for 2020. International Food Policy Research Institute (IFPRI), Washington, DC, USA, No. 44, 2 pp, 1997.

The status of forests: the Global Forest Resources Assessment 2000. In: State of the World's Forests 2001. FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations, 29-59, 2001.

Tuomenvirta H., Alexandersson H., Drebs A., Frich P. and Nordli P. Ø. Trends in Nordic and Arctic temperature extremes and ranges. *Int. J. Climatol.* 2000.

UNFCCC - *United Nations Framework Convention on Climate Change*: Issues in the negotiating process (<http://www.unfccc.int/issues>).

Vitousek P.M., Aber J.D., Howarth R.W., Likens G.E., Matson P.A., Schindler D.W., Schlesinger W.H. and Tilman D.G. Human alteration of the global nitrogen cycle: sources and consequences. *Ecological Applications*, 7, 737-750, 1997.

Wigley T.M.L. The Science of Climate Change: Global and U.S. perspectives. National Center For Atmospheric Research, June 29, 1999.