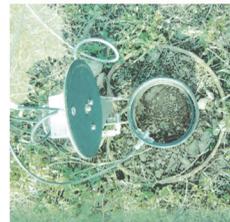


Foreste e ciclo del carbonio in Italia: come mitigare il cambiamento climatico



2. Foreste e ciclo del carbonio in Italia: come mitigare il cambiamento climatico

Coordinatore del progetto:

Giovanni Sanesi
Dipartimento di Scienze delle Produzione Vegetali
Universita degli Studi di Bari
Via Amendola 165/A 70126 Bari , ITALY

Responsabili scientifici del progetto:

Giovanni Sanesi	Paola Mairota	
Tel. +39 080 5443023	Tel. +39 080 5443021	Revisione critica
Fax +39 080 5442508	Fax +39 080 5442508	del testo a cura di
Email: sanesi@agr.uniba.it	Email: p.mairota@agr.uniba.it	Giuseppe Colangelo

“Nessuna parte di questo documento può essere in alcun modo riprodotta, distribuita o pubblicata sotto altra forma, senza il consenso della Fondazione Gas Natural e degli editori”.

Le tabelle e le immagini, salvo diversa indicazione, sono da attribuirsi agli autori dei singoli contributi.

Si autorizza la riproduzione, l'utilizzazione e la diffusione dei testi e delle immagini citando fonte testuale e fotografica a cui restano i diritti di proprietà intellettuale.

Citazione bibliografica consigliata:

Sanesi G., Mairota P. [a cura di] 2010. Foreste e ciclo del carbonio in Italia: come mitigare il cambiamento climatico, pp.240.

Pubblica

Fondazione Gas Natural

Plaça del Gas, 1
Edificio C, 3.^a planta
08003-Barcelona, España
Teléfono: 93 402 59 00 Fax: 93 402 59 18
www.fundaciongasnatural.org

1.^a edizione, 2010

ISBN: 978-84-613-7161-7

Registrato a:

Stampato a

Elenco autori:

Giorgio Alberti *Università di Udine*
Anna Barbati, *Università della Tuscia*
Massimo Bianchi, *Unità di ricerca per il Monitoraggio e la Pianificazione forestale, CRA- MPF*
Giuseppe Colangelo, *Università di Bari*
Piermaria Corona, *Università della Tuscia*
Dario De Filippis, *Università di Bari*
Marco Fioravanti, *Università di Firenze*
Lorenzo Guerci, *Università di Padova*
Patrizia Gasparini, *Unità di ricerca per il Monitoraggio e la Pianificazione forestale, CRA- MPF*
Raffaele Laforteza, *Università di Bari*
Vincenzo Leronna, *Università di Bari*
Giorgio Matteucci, *Istituto per i Sistemi Agricoli e Forestali del Mediterraneo-CNR, Cosenza*
Gianfranco Minotta, *Università di Torino*
Francesco Minunno, *Università di Bari*
Angelo Nolè, *Università della Basilicata*
Giuseppe Notarangelo, *Unità di ricerca per il Monitoraggio e la Pianificazione forestale, CRA- MPF*
Giovanni Notarnicola, *Università di Bari*
Alessandro Peressotti, *Università di Udine*
Davide Pettenella, *Università di Padova*
Giovanni Sanesi, *Università di Bari*
Giuseppe Scarascia Mugnozza, *Università della Tuscia*
Giovanni Tabacchi, *Unità di ricerca per il Monitoraggio e la Pianificazione forestale, CRA- MPF*

“Opera realizzata nell’ambito di accordi per attività di ricerca in tema di tutela e protezione ambientale tra l’Università degli Studi di Bari (Comitato per le Politiche Ambientali e per la Qualità della Vita) e la Fondazione Gas Natural, in base a quanto previsto dal protocollo d’intesa in materia di salvaguardia ambientale, siglato il 21 febbraio 2008, tra la Regione Puglia e la Fondazione Gas Natural.”



Indice

Prefazione di Pedro-A. Fábregas.....	9
1. Premessa	13
2. Introduzione	19
2.1 Cambiamenti ambientali e ciclo del carbonio.....	19
2.1.1 Un esperimento globale.....	19
2.1.2 Carbonio nell'atmosfera e anomalie climatiche.....	23
2.1.3 Bilancio del carbonio e ruolo della biosfera.....	24
2.1.4 Ruolo degli oceani e dei mari nel ciclo del carbonio.....	28
2.1.5 <i>Biochar</i> : definizioni e potenzialità.....	29
3. Foreste e mitigazione atmosferica	33
3.1 Impatto dei cambiamenti climatici sulle foreste.....	33
3.2 Fertilizzazione carbonica e risposta degli ecosistemi.....	39
3.3 Quali strategie forestali per contrastare il "Global Change".....	42
4 Metodologie per la stima degli assorbimenti di CO₂ da parte dei sistemi forestali	47
4.1 Introduzione: i serbatoi forestali di carbonio (<i>Carbon Sinks</i>).....	47
4.1.1 Metodi inventariali.....	48
4.2 Misura dei flussi di CO ₂ negli ecosistemi forestali.....	56
4.2.1 Tecnica micrometeorologica della correlazione turbolenta (<i>Eddy Covariance</i>).....	56
4.2.2 Modelli di processo su base funzionale.....	60
4.3 Il ruolo della respirazione del suolo nel bilancio del carbonio nelle foreste: recenti progressi e quesiti aperti.....	64
4.3.1 Introduzione.....	64
4.3.2 Metodi di misura e di partizione del flusso.....	65
4.3.3 Meccanismi di controllo.....	70
4.3.4 Sviluppi futuri.....	73

5. Le norme internazionali relative al ruolo del settore forestale nella riduzione delle emissioni di gas serra	75
5.1 il ruolo delle foreste nelle politiche di mitigazione del cambiamento climatico.....	75
5.2 Le foreste nel Protocollo di Kyoto.....	78
5.3 <i>C-Sink & C-Source</i> : il problema della deforestazione.....	83
5.4 Le foreste negli interventi volontari di mitigazione del cambiamento climatico.....	85
6 Funzione <i>carbon stock</i> e <i>carbon pool</i> nei sistemi forestali, nel legno e nei suoi prodotti derivati	89
7 Inventario Forestale Nazionale (INFC) e ruolo delle piantagioni forestali	103
7.1 Introduzione.....	103
7.2 Lo schema di campionamento.....	108
7.3 Le procedure di navigazione e di posizionamento dei punti di campionamento al suolo.....	111
7.4 Le prime due fasi campionarie e la stima delle superfici.....	115
7.5 La terza fase campionaria e le stime relative ai vari attributi quantitativi dei boschi.....	120
7.6 La divulgazione e l'impiego dei risultati inventariali.....	127
7.7 Il contributo italiano alla mitigazione dei cambiamenti climatici: il ruolo delle piantagioni forestali.....	132
7.7.1 Le piantagioni forestali in Italia.....	132
7.7.2 Le piantagioni forestali in Puglia.....	133
7.8 Il contributo degli impianti forestali all'assorbimento del carbonio.....	141
7.8.1 Le stime di carattere generale.....	141
7.8.2 I dati sperimentali.....	141
7.9 Conclusioni.....	144

8 Orizzonti operativi della pianificazione e della gestione forestale a supporto delle politiche sui cambiamenti climatici	147
8.1 Introduzione.....	147
8.2 Nuovi impianti forestali.....	149
8.2.1 Rimboschimenti.....	149
8.2.2 Piantagioni da legno.....	151
8.2.3 Compatibilità ambientale dei nuovi impianti.....	153
8.3 Ricolonizzazione boschiva.....	155
8.4 Attivazione della gestione e pianificazione.....	157
8.5 Conclusioni.....	160
9. Gli interventi di gestione forestale che possono mitigare il cambiamento climatico	163
9.1 Introduzione.....	163
9.2 Potenzialità e limiti delle foreste come serbatoi di carbonio.....	164
9.3 I <i>C-Sink</i> nell'ambito di alcune grandi iniziative regionali.....	168
9.3.1 Le misure forestali dei piani di sviluppo rurale.....	168
9.3.2 Il progetto nuovi boschi e sistemi verdi della regione lombardia.....	170
9.4 Esempi di interventi di <i>c-sink</i> in campo forestale.....	170
9.4.1 Il bosco permanente.....	173
9.4.2 L'arboreto a ciclo medio-lungo.....	174
9.4.3 Il pioppeto.....	176
9.4.4 La <i>short rotation forestry/coppice</i>	177
9.4.5 Interventi di gestione forestale.....	178
9.4.6 Il fenomeno dell'espansione naturale del bosco.....	179
9.5 Conclusioni.....	180
10. Primo contributo sulla capacità di accumulo del carbonio nei rimboschimenti di Pino d'Aleppo in Puglia	183
10.1 Introduzione.....	183
10.2 Materiali e metodi.....	185
10.3 Risultati.....	191
10.4 Discussione.....	208
10.5 Ringraziamenti.....	210

11. Conclusioni	211
12. Bibliografia	213
12.1 Capitolo 2.....	213
12.2 Capitolo 3.....	214
12.3 Capitolo 4.....	218
12.4 Capitolo 5.....	223
12.5 Capitolo 6.....	224
12.6 Capitolo 7.....	224
12.7 Capitolo 8.....	227
12.8 Capitolo 9.....	228
12.9 Capitolo 10.....	230
12.10 Capitolo 11.....	232
13. Glossario	233



Prefazione

Scrivere la prefazione di un libro sui boschi e il cambiamento climatico, a poche settimane dalla trascendentale Conferenza di Copenhagen sulla continuità del Protocollo di Kyoto, svoltasi nel dicembre del 2009, è particolarmente complesso, dato che tutti, o quasi tutti, i referenti di questi ultimi anni sono entrati in una fase di questionamento che deve cedere il passo ad una riflessione profonda e serena sulla realtà scaturita da questi nuovi parametri, che dovranno essere senza dubbio rispettosi verso la complicata geostrategia internazionale e i suoi permanenti equilibri.

È un momento difficile che ci offre però la gran opportunità di abbracciare un nuovo pensiero fresco, riflessivo e orientato al futuro, che ci permetta di mantenere e migliorare il livello dell'attività economica, consentendoci, però, nell'ambito del dinamismo sociale, di controllare in maniera più efficiente l'impatto sull'ambiente delle emissioni gassose ad effetto serra.

Com'è risaputo, i boschi hanno avuto, ed hanno, una grande importanza come meccanismo naturale di regolazione del contenuto dei gas ad effetto serra nell'atmosfera, grazie alla capacità che hanno le loro strutture vegetali, attraverso la fotosintesi, di stoccare il biossido di carbonio, producendo il cosiddetto effetto pozzo, che probabilmente, in un linguaggio più moderno, dovremmo denominare cattura del CO₂, «avant la lettre».

I boschi, però, proteggono anche il manto vegetale che, a sua volta, trattiene il metano, un altro gas ad effetto serra, evitando, allo stesso tempo, gli effetti negativi dell'erosione del terreno; sono proprio questi ultimi, infatti, gli aspetti maggiormente negativi delle deforestazioni, siano esse conseguenza dell'installazione di infrastrutture urbanistiche o di telecomunicazioni o della coltivazione di piante suscettibili di una successiva utilizzazione energetica.

A livello globale si deve considerare che ci troviamo davanti ad una situazione chiaramente duale con deforestazioni progressive, soprattutto in Sud America e

superfici alberate in importante aumento in Europa, in seguito all'esistenza di numerosi piani di protezione del territorio adottati sia dall'Unione Europea che dalle legislazioni di ogni singolo Paese.

In effetti, parecchi aspetti rilevanti riguardanti la tematica dei boschi sono relativamente poco noti alla società, in generale, come, ad esempio, il fatto che i boschi stoccano chiaramente CO₂ finché gli alberi sono in crescita, ma la loro utilità, da questo punto di vista, si riduce quando raggiungono la maturità.

O, per fare un altro esempio, l'inequivocabile necessità di sfruttare i boschi con moderne tecniche di gestione forestale per riuscire ad ottimizzare la cattura del biossido di carbonio che implica il ripopolamento, lo sfruttamento e il disboscamento pianificato, con una selezione preliminare delle specie allo scopo di ottimizzare la capacità di assorbimento e adattamento sia al terreno che al clima.

Non dobbiamo dimenticare che se il legno è utilizzato nella decorazione o nella costruzione, può mantenere stabile il biossido di carbonio per molto tempo, mentre se marcisce nel bosco, sprigiona il carbonio trattenuto, come se in un altro tipo d'utilizzo si decidesse di bruciare il legno per produrre energia.

Si dovrebbe, quindi, riuscire a migliorare lo sfruttamento razionale del bosco partendo da prospettive tecnologiche e riuscendo a conciliarlo con un utilizzo sempre maggiore del legno in usi alternativi rispetto alla semplice combustione.

La trasformazione degli alberi in prodotti forestali, quali il legno segato, il compensato o la carta non presuppone di per sé l'emissione di carbonio nell'atmosfera, infatti, il carbonio fissato nella massa forestale rimane nei prodotti derivanti dal bosco lungo il loro intero ciclo di vita. Il legno utilizzato per la costruzione o per gli arredi stocca efficacemente il carbonio per molti anni. Al contrario, la produzione di materiali di costruzione come le materie plastiche, l'alluminio o il cemento, richiedono, in genere, grandi quantitativi di combustibili fossili, di conseguenza sostituirli con il legno offre importanti benefici nella riduzione delle emissioni di carbonio.

Lo scopo di questo libro è quello di contribuire ed avanzare nella conoscenza dei boschi e soprattutto nella tematica dell'effetto pozzo. Nel corso dell'opera s'illustreranno diversi aspetti di funzionamento degli ecosistemi terrestri, metodologie di quantificazione

del carbonio fissato nei boschi, aspetti di pianificazione della gestione forestale, analisi del ciclo vitale dei prodotti forestali, ecc.

In definitiva, un lungo percorso, colmo di idee e di opportunità, che apporta metodologie ed elementi partendo da approcci teorici ma offrendo al contempo parecchi elementi pratici e, quindi, utilizzabili.

La Fundación Gas Natural è stata creata nel 1992 dal Grupo Gas Natural, e sin dal 2001 promuove iniziative rivolte, in linea di massima, alla sensibilizzazione ambientale, soprattutto nell'interfaccia energia-ambiente, attraverso atti, ricerche e pubblicazioni, sviluppando al contempo attività specifiche in sette Paesi in Europa, in Sud America e nel Magreb; dispone, inoltre, di servizi formativi per professionisti del settore del gas e dell'elettricità e, per ultimo, ma non meno importante, realizza un'intensa attività di salvaguardia, tutela e diffusione del patrimonio storico e culturale del settore e dell'impresa che la fondò, sorta nel ormai lontano 1843.

Per la Fundación Gas Natural è una gran soddisfazione presentare questa prima pubblicazione realizzata in Italia, nell'ambito della sensibilizzazione ambientale, nucleo strategico della nostra attività. La pubblicazione è stata realizzata con la collaborazione entusiastica del Dipartimento di Scienze delle Produzioni Vegetali dell'Università di Bari, a cui va il nostro doveroso ringraziamento per il brillante studio realizzato. Il nostro grazie va anche al Governo della Regione Puglia per il sostegno ricevuto nell'avviare e eseguire questo lavoro.

Abbiamo avuto la gran fortuna di poter contar su autori di qualità e prestigio provenienti da diverse università e centri di ricerca italiani, coordinati e diretti dai professori Giovanni Sanesi e Paola Mairota del Dipartimento di Scienze delle Produzioni Vegetali dell'Università di Bari. È doveroso porre l'accento sulla qualità, la volontà e lo sforzo dimostrati dai 24 autori del libro nell'apportare prospettive ed informazioni di zone complementari allo scopo di realizzare un lavoro dettagliato e globale sui boschi esistenti in Italia.

Le Università e le istituzioni rappresentate abbracciano una vasta area giacché hanno sede nelle regioni della Basilicata, Calabria, Friuli-Venezia-Giulia, Lazio, Puglia, Toscana, Trentino-Alto Adige e Veneto.

Ci auguriamo che questa pubblicazione sia utile per reagire, con l'aiuto di nuovi elementi e nuove possibilità, di fronte alla sfida della salvaguardia ambientale.

E, come disse a suo tempo, ed è ancora attuale, Gabriela Mistral (Chile; 1889-1957), quale elogio al lavoro personale e collettivo, all'impegno e alla dedizione per il raggiungimento di un fine:

“Là dove c'è un albero da piantare,
Piantalo tu.
Là dove c'è un errore da correggere,
Correggilo tu.
Là dove c'è uno sforzo che tutti schivano,
Fallo tu.
Sii tu colui che sposta la pietra dal cammino.”

Pedro-A Fábregas

Direttore Generale
Fundación Gas Natural

2010.01.11



1

Premessa

Giovanni Sanesi, Paola Mairota

I boschi e le risorse forestali in genere hanno avuto nella storia del nostro pianeta e della civiltà umana un ruolo fondamentale. L'atmosfera come la conosciamo oggi, respirabile ed adatta alla vita degli animali, è stata raggiunta solo nel Carbonifero grazie alla grande diffusione delle piante terrestri che avvenne in quel periodo. Le piante produssero grandi quantità di ossigeno come sottoprodotto della funzione clorofilliana necessaria al loro sostentamento. Questa produzione di ossigeno, unitamente al seppellimento di grandi quantità di sostanza organica contenente carbonio prima presenti nell'aria come anidride carbonica, permise a partire da circa 350 milioni di anni fa, di arrivare al 21% di ossigeno libero che oggi caratterizza l'atmosfera.

Le foreste sono state, inoltre, un centro importante per l'evoluzione delle civiltà umane fornendo materiali legnosi e non legnosi necessari al riscaldamento, alla costruzione di utensili, attrezzature ed abitazioni, al sostentamento, all'alimentazione e alla cura del corpo. Al tempo stesso i boschi sono stati luoghi dove si sono sviluppati miti, leggende e i primi riti religiosi che hanno caratterizzato le nostre civiltà nel corso dei secoli. Nella cultura corrente è acquisito che gli alberi e le risorse forestali possiedano un'ampia ed articolata multifunzionalità che comprende la fornitura di materiali e di servizi, ma che abbraccia anche la sfera del benessere. Nell'ambito di questa multifunzionalità un ruolo importante che si sta evidenziando nel corso degli ultimi due decenni è quello relativo alla possibilità di contrastare i processi di cambiamento climatico determinati dal rilascio di grandi quantità di gas serra, prevalentemente anidride carbonica, e di limitare i processi di riscaldamento dell'atmosfera (*global change*). Si tratta quindi di svolgere una funzione essenziale alla nostra stessa sopravvivenza.

La crescente preoccupazione della comunità scientifica per i fenomeni legati al cambiamento climatico e al riscaldamento dell'atmosfera, potenziati dalle attività umane

legate soprattutto all'uso dei combustibili fossili e alle trasformazioni di uso delle coperture del suolo, ha determinato la necessità di una presa di coscienza anche da parte dell'opinione pubblica generale rispetto alla possibilità di assumere comportamenti individuali congrui.

Tale possibilità passa attraverso il potenziamento dei livelli di informazione attinenti ai fattori di regolazione degli scambi atmosferici in grado di influenzare gli elementi del clima globale, in particolare temperatura dell'aria e il regime delle precipitazioni.

Scopo di questo volume è quello di contribuire a questa informazione per gli aspetti relativi agli ecosistemi forestali, componenti dei paesaggi e della biosfera cui la scienza riconosce un ruolo chiave nella regolazione del bilancio del carbonio, così nel mantenimento della biodiversità e della identità culturale dei popoli della terra. Per contribuire, in definitiva, a formare nell'opinione pubblica, la capacità critica per discriminare tra atteggiamenti di consumo etico e sostenibile come alternativa a quelli "predatori".

Tra gli ecosistemi forestali, i boschi in particolare, sono in grado di conservare anche per periodi di tempo relativamente lunghi il carbonio assimilato, soprattutto nelle strutture somatiche delle loro componenti caratterizzanti (gli alberi) e nel suolo forestale. Inoltre l'uso dei prodotti legnosi consente di mantenere "bloccate" considerevoli quantità di carbonio per tutto il ciclo di vita delle opere e dei manufatti. Gli ecosistemi forestali, quindi, nel ciclo geochimico ed in quello biogeochimico del carbonio, svolgono contemporaneamente le funzioni di pool di scambio e di pool di riserva.

La specie umana è sempre stata in qualche modo dipendente dagli ecosistemi forestali, sia attraverso l'impiego dei beni materiali prodotti dal bosco, dai combustibili alle materie prime da opera e da manifattura, dai frutti alla frasca e alla lettiera, sia attraverso il riconoscimento al bosco di importanti funzioni legate alla protezione idrogeologica e alla dimensione estetico-ricreativa del vivere.

In tempi relativamente recenti della storia dell'uomo la relazione con il bosco è divenuta molto complessa e per certi versi contraddittoria per effetto di fenomeni quali il forte incremento demografico verificatosi soprattutto a partire dalla rivoluzione industriale e culminato negli ultimi cinquanta anni del secolo appena trascorso e il progressivo aumento degli standard di consumo delle società occidentali, cui si stanno adeguando anche parti consistenti delle popolazioni di paesi cosiddetti in via di sviluppo, dovuto alle politiche economiche e di mercato globale.

Da una parte, la spinta demografica ha determinato una forte pressione sulle foreste del pianeta per far fronte al crescente fabbisogno di terre da destinare a un'agricoltura e a una zootecnia sempre più intensive. Analogamente avviene per la risorsa acqua la cui disponibilità è regolata dalle foreste stesse (in particolare per l'acqua dolce). Dall'altra parte l'aumento della componente inurbata della società umana e del suo progressivo distacco e perdita di consuetudine con i processi produttivi primari hanno determinato l'incapacità di comprendere il legame tra competenza nell'uso delle risorse e disponibilità di beni e servizi. Questi aspetti hanno come conseguenza o il totale disinteresse verso le questioni della sostenibilità e della equità intergenerazionale, così come verso quelle relative alla conduzione di stili alimentari e di consumo critico, o, all'estremo opposto, la idealizzazione dell'ambiente non urbano e del bosco in particolare, e lo sviluppo di atteggiamenti relativi all'ambiente basati più su posizioni ideologiche, se non addirittura fideistiche che su una reale competenza ecologica.



Figura 1.1 Uno sviluppo industriale legato all'uso di risorse energetiche potenzialmente inquinanti (carbone) e ad un supporto non adeguato di tecnologie per la salvaguardia dell'ambiente hanno determinato un elevato rilascio di gas serra (Aree industriali della Ruhrgebiet – Germania)..

In media, comunque, si evidenzia una grande sottovalutazione del contributo individuale nei confronti della mitigazione del problema comune, ovvero l'inconsapevolezza delle responsabilità individuali nei confronti dell'impronta ecologica del proprio stile di vita. Un caso emblematico, di grande attualità, è quello relativo al crescente consumo dell'olio di palma, materia grassa poco costosa, componente di centinaia di prodotti (margarine, cioccolata, formaggi fusi, biscotti, patate fritte tra quelli alimentari, cosmetici e detersivi, ma anche biocombustibile per trazione) di note multinazionali, per la cui produzione vengono compiute o la trasformazione in piantagioni di palma delle torbiere del Sud Est asiatico o, come segnalato anche dall'UNEP, la deforestazione (mediante abbattimento e bruciatura) delle foreste del Borneo (Malesia, Indonesia, Brunei), della Thailandia, della Cambogia, delle Filippine. Ciò ha conseguenze drammatiche in termini di biodiversità, sulle economie delle comunità umane locali e sulle emissioni di CO₂, in contraddizione con lo stesso protocollo di Kyoto. La maggiore contraddizione deriva probabilmente dall'impegno preso da molti governi, UE, ma anche Cinese e Indiano, di incrementare l'uso di biocarburanti, tra cui l'olio di palma, in tempi relativamente brevi (2012-2020). Ciò determinerà l'effetto paradossale che per abbattere le emissioni di gas serra derivanti dalla combustione degli idrocarburi si genereranno emissioni ancora più consistenti attraverso la distruzione di migliaia di ettari di torbiere, tra gli ecosistemi più importanti al mondo per lo stoccaggio del carbonio, e di foresta pluviale tropicale. E' opportuno sottolineare come numerose voci critiche nei confronti di questo tipo di politica energetica siano presenti all'interno dello stesso parlamento della UE, così come è importante evidenziare che alcune amministrazioni regionali, tra le quali la Toscana, in attesa di un riposizionamento della politica energetica europea e nazionale, abbiano assunto decisioni che prevedono una moratoria nei confronti delle centrali termoelettriche alimentate dall'olio di palma.



Figura 1.2 L'imponente sviluppo demografico di alcune nazioni e il conseguente sviluppo economico sono un'altra delle componenti alla base del cambiamento climatico (Chengdu – Cina).

L'assunzione di responsabilità individuale da parte dei consumatori non è uno sforzo vano se si pensa che, attraverso la crescita dell'interesse e della domanda di beni e servizi rispondenti a precisi criteri di qualità, certificata secondo norme e standard nazionali e internazionali si sono innescati, da una parte il processo di definizione di strumenti di orientamento e di valutazione della gestione forestale verso modelli sostenibili (GFS), e dall'altra quello della messa a punto di sistemi di certificazione dei prodotti forestali, in grado di promuovere anche a livello di mercato la produzione sostenibile.

Per illustrare i processi di *global change* e fornire una corretta informazione sul ruolo reale che le risorse forestali possono svolgere, la Fondazione Gas Natural ha finanziato uno studio al Dipartimento di Scienze delle Produzioni Vegetali dell'Università degli Studi di Bari che ha visto coinvolti esperti del mondo forestale provenienti da una decina di istituzioni di tutta Italia. Un ruolo importante è stato svolto anche dall'Accademia Italiana di Scienze Forestali che ha favorito la realizzazione di questo *network* di studio. Il testo cerca di chiarire le diverse questioni legate al riscaldamento dell'atmosfera, i flussi dei gas serra, le origini degli stessi e l'importanza che gli ecosistemi terrestri hanno nel limitare i fenomeni di degrado della biosfera. Sono inoltre evidenziate le azioni che, a livello internazionale, sono portate avanti in questo campo e gli impegni che i singoli stati hanno sottoscritto. Al tempo stesso sono illustrati gli interventi, che in ambito forestale si possono realizzare per potere conseguire gli obiettivi compresi in questi grandi accordi internazionali.



Figura 1.3 Uno dei fenomeni più appariscenti del cambiamento climatico è rappresentato dal ritiro e dalla modifica dei ghiacciai (Perito Moreno - Argentina).

A corredo del testo è riportata una sintesi di una ricerca effettuata dal Dipartimento di Scienze delle Produzioni vegetali dell'Università di Bari nella quale si evidenzia come alcune formazioni forestali tipiche del paesaggio mediterraneo siano in grado di produrre biomassa e di conservare al suo interno l'anidride carbonica. Questa ricerca ha anche lo scopo di sensibilizzare il lettore nella percezione del reale danno che si viene a determinare quando queste formazioni forestali vengono interessate dagli incendi.

Pur avendo una finalità essenzialmente divulgativa, il testo non ha voluto rinunciare ad un lessico tecnico che è proprio del mondo della ricerca, ma che comunque fa sempre più parte della cultura corrente; per favorire una facile comprensione dei diversi termini e una loro condivisione nel linguaggio comune è stato allegato un glossario.



2

Introduzione

Giuseppe Scarascia Mugnozza, Giorgio Matteucci

2.1 Cambiamenti ambientali e ciclo del carbonio

2.1.1 Un esperimento globale

Due secoli fa l'umanità ha involontariamente avviato un esperimento globale attraverso la manipolazione delle caratteristiche ambientali della superficie del nostro pianeta. Questo esperimento sta cominciando a fornire risultati sempre più evidenti e coerenti tra loro, con conseguenze che si stanno imponendo all'attenzione dell'intera società umana.

Il cambiamento alquanto rapido della composizione dell'atmosfera che si è verificato soprattutto nell'ultimo secolo, con un'accelerazione negli ultimi anni, è un esempio di esperimento “non intenzionale”. Si tratta di una modificazione che avviene per la prima volta da quando l'umanità abita la Terra.

Infatti, con l'inizio dell'era industriale l'uomo sta modificando, ancorché involontariamente, la composizione chimica e le proprietà fisiche dell'atmosfera; in meno di due secoli; gas come l'anidride carbonica (CO_2), il metano (CH_4), l'ossido di azoto (N_2O) e altri ancora, sono aumentati rispettivamente del 30%, del 145% e del 15%, per effetto in gran parte delle attività antropiche. I principali imputati sono l'impiego di combustibili fossili per l'industria, per i trasporti e per il riscaldamento e il cambiamento d'uso del territorio attraverso l'erosione delle risorse forestali a beneficio dell'agricoltura e degli insediamenti. Se nel mondo vi è ancora incertezza e, in alcuni casi, scetticismo sulla reale portata dei cambiamenti ambientali o climatici, l'aumento di concentrazione di questi gas nell'atmosfera dimostra che l'uomo sta effettivamente modificando, e pesantemente, l'ambiente in cui vive. L'esperimento di cui siamo attori e, al contempo, possibili vittime, riguarda in particolare modo i processi innescati da queste alterazioni sulle proprietà dell'atmosfera.

Se analizziamo le componenti del sistema climatico globale, risulta evidente che l'atmosfera costituisce l'interfaccia attraverso la quale si verificano gli scambi di energia tra il Sole e la Terra e, al tempo stesso, l'atmosfera costituisce il rivestimento gassoso all'interno del quale le fluttuazioni dei parametri fisico-chimici danno origine nel breve termine, ore e giorni, agli eventi meteorologici e sul lungo termine, al clima. La sorgente di energia che guida i processi climatici è il Sole che emette gran parte della sua radiazione nella componente visibile dello spettro elettromagnetico e, in misura minore, nell'infrarosso e nell'ultravioletto. La quantità media di energia solare che raggiunge l'atmosfera è di circa 340 Wm^{-2} ; approssimativamente, il 31% di questa energia è riflessa verso lo spazio dalle molecole, dagli aerosol (piccole particelle di polveri e gocce delle dimensioni dell'ordine di micrometri) e dalle nuvole presenti nell'atmosfera o dalla superficie terrestre (Kiehl and Trenberth 1996). Circa 235 Wm^{-2} rimangono sulla Terra riscaldandone la superficie e l'involucro gassoso che costituisce l'atmosfera. Per bilanciare l'energia in arrivo la Terra stessa irradia, in media, la stessa quantità di energia, in direzione opposta, verso lo spazio. Questo bilanciamento avviene grazie all'emissione di radiazione ad onde lunghe, ovvero nell'infrarosso termico. Una porzione di questa radiazione che lascia l'atmosfera, provenendo dalla superficie terrestre, è trasmessa senza ostacoli attraverso l'atmosfera, nella "finestra" costituita dall'azoto e dall'ossigeno, gas trasparenti alla radiazione infrarossa. Gran parte di questa radiazione però viene assorbita da una piccola frazione di gas, non più del 2% dell'atmosfera, che sono radiativamente attivi e vengono perciò chiamati gas ad effetto serra o gas-serra. Questi sono il vapor d'acqua, la CO_2 , il CH_4 , l' N_2O , l'ozono (O_3), i clorofluorocarburi (CFC) e altri componenti gassosi minori. I gas-serra si comportano come una "coperta" che circonda la superficie terrestre poiché assorbono radiazione termica e la riemettono sia verso l'esterno sia di nuovo verso la Terra mantenendola più calda di quanto in realtà dovrebbe essere. In questo processo anche le nuvole producono un riscaldamento della superficie del nostro pianeta poiché intrappolano la radiazione nell'infrarosso termico, riemettendola verso il basso; contemporaneamente, però, riflettono quasi completamente la radiazione solare incidente, determinando così un raffreddamento della Terra. La risultante di questi due effetti quasi uguali e opposti si manifesta con una modesta ma significativa azione di raffreddamento del clima globale da parte dei corpi nuvolosi.

Ogni fattore che, alterando la radiazione ricevuta dal Sole o persa verso lo spazio, contribuisce ad una modifica della redistribuzione di energia tra l'atmosfera, la superficie terrestre e gli oceani, può influenzare il clima. Un aumento di concentrazione di CO_2 , così come un incremento di radiazione emessa dal Sole, si traduce in un aumento di energia radiante a disposizione della superficie terrestre (*positive radiative forcing*) al quale il sistema climatico risponde in modo da ristabilire l'equilibrio energetico. In pratica il processo determina un aumento della temperatura superficiale del nostro pianeta che è così in grado di emettere una maggiore quantità di energia ad onde lunghe per mantenere il suddetto equilibrio energetico.

L'aumento della concentrazione dei gas-serra, pertanto, sta influenzando, e sempre più influenzerà in futuro, l'efficienza con cui la Terra si raffredda verso lo spazio. Una maggior quantità di radiazione terrestre in uscita verrà assorbita dall'atmosfera e riemessa ad altezze maggiori e a temperature più basse. Questo fenomeno si tradurrà in un riscaldamento degli strati più bassi dell'atmosfera e della superficie terrestre, determinando un aumento dell'effetto serra. Tale incremento del riscaldamento terrestre dipende dall'aumento della concentrazione atmosferica dei gas-serra, dalle proprietà radiative di questi diversi gas e dalla concentrazione di altri gas-serra già presenti nell'atmosfera (IPCC 1990).



Figura 2.1 Parco Nord di Milano. I cambiamenti climatici possono essere mitigati a livello urbano attraverso la costituzione di aree verdi.

Esistono però altre componenti dell'atmosfera che hanno, al contrario, un effetto negativo sul riscaldamento terrestre. Oltre alle nuvole, vanno ricordati gli aerosol della troposfera, generalmente derivati dall'emissione di anidride solforosa prodotta dalla combustione dei combustibili fossili o dagli incendi delle foreste; gli aerosol assorbono e riflettono la radiazione solare e possono aumentare la quantità di nuvole e le loro proprietà riflettenti. Nel complesso, gli aerosol troposferici tendono ad avere un effetto radiativo negativo (*negative radiative forcing*), determinando un raffreddamento climatico. Il loro tempo di vita (*lifetime*), dell'ordine di giorni o settimane, è più breve di quello della maggior parte dei gas-serra, variabile tra le decine di anni e i secoli, cosicché le loro concentrazioni rispondono rapidamente al cambiamento dei livelli di emissione. Anche l'attività vulcanica può immettere nella stratosfera grosse quantità di composti gassosi dello zolfo che vengono poi trasformati in aerosol. Il risultato può essere un consistente, anche se transitorio, raffreddamento della superficie terrestre e dei bassi strati dell'atmosfera per periodi di pochi mesi o anni, come si è verificato con le recenti eruzioni del Pinatubo e del St. Helen.

La combinazione di tutti questi fattori e delle loro azioni e retroazioni determina attualmente un aumento della radiazione assorbita dal sistema terrestre pari a circa 2.5 Wm^{-2} ; l'anidride carbonica vi contribuisce per il 60%, risultando così il più importante gas ad effetto serra, il metano per il 20% e gli altri gas con percentuali minori (IPCC 1994).

Ogni modificazione del bilancio radiativo della Terra, che come si è visto può essere causata dall'aumento dei gas-serra e degli aerosol atmosferici, determinerà la variazione delle temperature dell'aria e degli oceani nonché della circolazione atmosferica e del tempo meteorologico. Questi cambiamenti saranno anche accompagnati da modificazioni del ciclo dell'acqua attraverso l'alterazione della distribuzione delle nuvole o la variazione del regime delle precipitazioni e dei processi evapotraspirativi.

Ogni cambiamento del clima indotto dall'uomo si sovrappone alle variazioni climatiche di fondo di origine naturale che avvengono su un ampio spettro di scale spazio-temporali. Cambiamenti naturali del clima possono verificarsi come conseguenza di fattori esogeni quali l'aerosol immesso nell'atmosfera dalle eruzioni vulcaniche come quella già citata del Pinatubo avvenuta nel 1991 (Hansen *et al.* 1992) oppure in seguito alle variazioni cicliche dell'emissione di energia dal Sole. I cambiamenti naturali del clima possono verificarsi anche per il mutare di fattori endogeni come nel caso del fenomeno di El Niño (*El Niño-Southern Oscillation, ENSO*) che è il risultato di complesse interazioni tra diverse componenti, l'oceano e l'atmosfera, che possono modificare il clima.

2.1.2 Carbonio nell'atmosfera e anomalie climatiche

L'analisi di variazioni periodiche di concentrazione di gas-serra effettuata in carote di ghiaccio prelevate in Antartide ha evidenziato che la concentrazione atmosferica di CO₂ ha oscillato per molto tempo (circa 600000 anni) tra un valore minimo di circa 180 ppm e un livello massimo, mai superiore a 300 ppm e che questo intervallo di variazione si è mantenuto stabile fino a circa il XIX secolo. Da allora, in coincidenza con le prime rivoluzioni industriali, la concentrazione è aumentata molto rapidamente, ben oltre i limiti mai superati in precedenza (Petit *et al.*, 1991; Siegenthaler *et al.*, 2005). Inoltre, sovrapponendo le oscillazioni temporali dei gas-serra di lungo periodo e quelle corrispondenti della temperatura dell'aria derivate dagli isotopi stabili dell'idrogeno, nelle stesse carote si riscontra una correlazione significativa tra questi due parametri (Siegenthaler *et al.*, 2005). Si può quindi ipotizzare che mediante l'alterazione del ciclo del carbonio e di altri gas-serra l'uomo stia effettivamente influenzando gli equilibri climatici.

Tra il 1995 ed il 2005, il tasso annuale di crescita della concentrazione di CO₂ degli ultimi 10 anni è risultato maggiore (1.9 ppm per anno) di quello registrato dall'inizio delle prime misure dirette, realizzate nella stazione di Mauna Loa (Hawaii, USA, Keeling *et al.*, 1995). Infatti, la media di crescita tra il 1960 ed il 2005 è stata di 1.4 ppm per anno (IPCC, 2007). Attualmente, il rilevamento della concentrazione di CO₂ ed altri gas-serra viene effettuato ormai in tutto il globo utilizzando una rete coordinata dal World Meteorological Institute. I dati provenienti dalla rete forniscono un'evidenza diretta dei cambiamenti in atto a carico dell'ambiente del nostro pianeta. A questo proposito l'ultimo rapporto (*Four Assessment Report*) dell'*Intergovernmental Panel on Climate Change* (vincitore del Nobel per la Pace del 2007 insieme ad Al Gore), segnala che già sono numerosi i cambiamenti che si stanno verificando e questi sono (IPCC, 2007):

- undici delle annate degli ultimi 12 anni (1995–2006) si posizionano nei primi 12 posti nella classifica delle più calde da quando esistono dati strumentali (1850), ;
- l'aumento di temperatura del periodo 1906-2005 è di 0.74 °C ed il tasso di incremento degli ultimi 50 anni (0.13 °C) è circa doppio di quello degli ultimi 100 anni, segnalando un'accelerazione nel cambiamento;

- nello stesso periodo i giorni e le notti fredde sono diventate meno frequenti, mentre sono aumentate le giornate calde ed le ondate di calore (come nel 2003, 2005 e 2007 in Europa);
- il tasso di aumento della temperatura alle alte latitudini (Artico, zone Boreali) è di circa il doppio di quello globale;
- l'area con permafrost (terreno congelato) stagionale è diminuita del 7% nell'emisfero nord;
- le precipitazioni, tra il 1990 ed il 2005 osservati hanno avuto andamenti variabili, con il Sahel, il Mediterraneo, il Sud Africa e parte dell'Asia meridionale che hanno visto diminuzioni di precipitazione, mentre nella parte meridionale del continente americano, nel Nord Europa e nell'Asia settentrionale e centrale si sono verificati aumenti degli apporti idrici;
- l'intensità dei singoli eventi di precipitazione è risultata in aumento in quasi tutte le aree;
- i periodi siccitosi più intensi e lunghi, dagli anni '70, sono stati osservati nelle zone tropicali e subtropicali;
- osservazioni dirette della temperatura oceanica, a partire dal 1961, indicano che la temperatura media degli oceani è aumentata fino ad una profondità di 3000 m;
- l'oceano, assorbendo calore (circa l'80% di quello aggiunto al sistema climatico), tende ad espandersi, contribuendo al *trend* generale di aumento del livello dei mari;
- i ghiacciai, la copertura nevosa e le calotte glaciali in Groenlandia e Antartide sono diminuiti;
- anche questo processo contribuisce all'aumento del livello dei mari che, a livello globale, ha mostrato un tasso di innalzamento pari a 1.8 mm per anno tra il 1961 ed il 2003, aumentato a 3.1 mm per anno tra il 1993 ed il 2003.

Tutti questi segnali, ormai, consentono di concludere che il riscaldamento globale è inequivocabile e che la responsabilità di esso possa essere assegnata con buona certezza (*very high confidence*) all'uomo (IPCC, 2007).

2.1.3 Bilancio del carbonio e ruolo della biosfera

Il ciclo del carbonio globale è rappresentato da scambi (flussi) tra i diversi serbatoi (pool) esistenti sulla Terra. I serbatoi principali sono i sedimenti marini, gli oceani, il suolo e la vegetazione terrestre e l'atmosfera. A questi possono essere aggiunte le riserve di combustibili fossili che, in realtà, sino alla rivoluzione industriale, erano un serbatoio che non aveva scambi con l'atmosfera. Nel ciclo del carbonio naturale, i maggiori flussi tra serbatoi ed atmosfera sono quelli legati alla fotosintesi ed alla respirazione (inclusi i disturbi) degli ecosistemi terrestri (circa 120 GtC anno⁻¹ nelle due direzioni¹), agli scambi tra oceani ed atmosfera (circa 90 GtC anno⁻¹ nelle due direzioni) ed al trasferimento di piccole quote tra serbatoi (vegetazione e suolo, oceani e sedimenti, Denman *et al.*, 2007).



Figura 2.2 Uno dei prodotti più significativi della attività fotosintetica è rappresentato dalla produzione di biomassa forestale.

¹ GtC: miliardi di tonnellate di carbonio. L'unità di misura indicata, pur essendo di uso ricorrente, non è corretta perché non ammessa nel Sistema di misura Internazionale (SI) nel quale è indicata, invece, con Petagrammo (Pg = 10¹⁵ grammi). Analogamente avviene per la tonnellata che corrisponde, nel SI, al Gigagrammo (Gg = 10⁹ grammi).

Sebbene i maggiori cambiamenti del ciclo globale del carbonio che si sono riflessi nell'aumento della concentrazione atmosferica siano riconducibili agli ultimi 150 anni, vi sono alcuni autori che ritengono che l'impatto dell'uomo sul bilancio globale del carbonio possa essere cominciato in realtà molto prima dell'avvento della Rivoluzione industriale e che questo sia visibile anche da dati oggettivi (Ruddiman, 2003). Circa 8000 anni fa ha avuto inizio un periodo di forte espansione dei terreni sottoposti a pratiche agricole, soprattutto a spese delle aree forestali, di pascolo e di vegetazione steppica. Una traccia di questi primi importanti processi di cambiamento di uso del suolo sono effettivamente identificabili nella composizione atmosferica di quel periodo sia per un improvviso aumento (10-20 ppm) della concentrazione della CO₂ sia per quello del metano, legato alla risicoltura (Ruddiman e Thomson, 2001). Sul lungo periodo, questa ipotesi stima in 300 Gt la quantità di carbonio che sarebbe stata immessa in atmosfera a causa di questi processi (Ruddiman, 2003). I cambiamenti climatici legati a questa immissione sono risultati limitati perché hanno operato su scale temporali lunghe (circa 8000 anni) rendendo possibile la compensazione degli effetti da parte della biosfera.

Il punto di "svolta" che determina lo squilibrio del ciclo del carbonio rispetto alle dinamiche naturali e alle variazioni "lente" è rappresentato dall'inizio dell'era industriale (XIX secolo) che è coinciso con l'avvio dell'immissione in atmosfera di sempre crescenti quantitativi di emissioni dovute all'uso dei combustibili fossili (carbone, petrolio, gas naturale). Inoltre, a partire da questo periodo, si è avuta una rapidissima espansione della popolazione mondiale che ha causato un forte impatto sull'uso del territorio con la deforestazione progressiva di vaste aree del pianeta e la trasformazione di pascoli naturali in aree agricole (Houghton, 2003). A partire da questo periodo, l'uso dei combustibili fossili, i cambiamenti di uso del suolo e, successivamente, la produzione di cemento dal carbonato di calcio diventano termini importanti nel ciclo del carbonio globale e ne determinano, sostanzialmente, lo squilibrio che si riscontra nell'aumento della concentrazione di CO₂ in atmosfera.

Dalla fondazione dell'IPCC, si sono susseguiti una serie di rapporti sul cambiamento climatico, le sue cause e gli scenari per il futuro. Proprio recentemente è uscito il Quarto Rapporto (l'uscita del prossimo è prevista nel 2014), oltre a fornire dati aggiornati sul ciclo globale del carbonio, ha rianalizzato quelli precedenti alla luce di nuove evidenze fornendo così un quadro storico del bilancio stesso (Denman *et al.*, 2007).

Nel mondo le emissioni annue di carbonio, dovute all'uso di energia fossile e alla produzione di cemento, sono risultate in costante aumento, passando da 5.4 GtC negli anni '80 a 6.4 GtC negli anni '90, sino ad arrivare a 7.2 GtC tra il 2000 ed il 2005 (Tab. 2.1). Il contributo dovuto alla deforestazione è di difficile quantificazione ed è stato stimato in 1.4-1.6 GtC anno⁻¹, con grossa incertezze e variabilità (Houghton, 2003; Achard *et al.*, 2004), contribuendo per il 20% alle emissioni globali.

Termini di bilancio	Anni '80*	Anni '90*	2000-2005*
Emissioni (combustibili fossili e cemento)	5.4±0.3	6.4±0.4	7.2±0.3
Emissioni da deforestazione	1.4 (0.4 - 2.3)	1.6 (0.5 - 2.7)	non disponibile
Accumulo in atmosfera	3.3±0.1	-1.8±0.8	-0.3±0.9
Assorbimento degli oceani	3.2±0.1	-2.2±0.4	-1.0±0.6
Assorbimento terrestre	4.1±0.1	-2.2±0.5	-0.9±0.6
Squilibrio netto (assorbimento terrestre residuale)	-1.7 (-3.4 - 0.2)	-2.6 (-4.3 - -0.9)	Non disponibile

Tabella 2.1 Valori netti del ciclo globale del carbonio (da Denman *et al.*, 2007, modificata).

* Valori in GtC anno⁻¹. Valori positivi indicano emissioni in atmosfera, valori negativi assorbimenti. Per il 2000-2005, il dato di emissioni da deforestazione e lo squilibrio netto, da esso derivato, non sono ancora stati stimati.

Mentre negli anni '80 e '90, l'accumulo in atmosfera si è mantenuto pressoché costante, questo è aumentato significativamente all'inizio di questo secolo (4.1 GtC anno⁻¹, Tab. 2.1), probabilmente in relazione ad eventi climatici estremi (Ciais *et al.*, 2005a) ed alla saturazione dell'assorbimento oceanico. Quest'ultimo ha mostrato valori relativamente costanti negli ultimi trent'anni (~ 2 GtC anno⁻¹). Il bilancio che si ottiene considerando, oltre ai termini sin qui descritti, anche l'assorbimento dovuto agli ecosistemi terrestri misurabile tramite misure di concentrazione atmosferica e modelli di trasporto (da -0.3 GtC anno⁻¹ negli anni '80 a -1 GtC anno⁻¹ nel 2000-2005, tab. 1), presenta un termine residuo di assorbimento ancora non identificato, spesso chiamato, in letteratura, "missing sink", molto variabile e attribuito agli scambi tra ecosistemi terrestri e atmosfera (Schimel *et al.*, 2001).



Figura 2.3 Produzione di carbone vegetale in Giappone.

Crescenti sono le evidenze che assegnano al comparto forestale un ruolo significativo nell'assorbimento di questa parte del bilancio di carbonio e sul fatto che, comunque, il ruolo delle foreste nel ciclo globale del carbonio sia di notevole importanza.

Le foreste occupano, infatti, circa il 30% delle terre emerse, ma il carbonio contenuto negli ecosistemi rappresenta l'80% del carbonio epigeo totale ed il 40% di quello ipogeo. Le foreste sono responsabili del 60-70% della produttività primaria di tutti gli ecosistemi terrestri (Melillo *et al.*, 2003). Per quanto riguarda i flussi, rilevante è il fatto che il 70% degli scambi di carbonio tra biosfera ed atmosfera avvenga a livello di ecosistemi forestali. Questo conferma l'importanza del ruolo delle foreste nel ciclo biogeochimico globale del carbonio anche nel quadro delle crescenti emissioni di carbonio nell'atmosfera e dei cambiamenti climatici in atto.

2.1.4 Ruolo degli oceani e dei mari nel ciclo del carbonio

Gli oceani (e i mari) formano, insieme agli ecosistemi terrestri, i due compartimenti naturali che giocano un ruolo fondamentale nel ciclo globale del carbonio. Prima che l'uomo influenzasse il ciclo naturale del carbonio con le sue attività di cambiamento di uso del suolo, cominciate tra 8000 e 5000 anni fa (Ruddiman, 2003) e di sfruttamento dei combustibili fossili a cominciare dall'era industriale, questi due compartimenti erano i soli a regolare il ciclo del carbonio globale. A livello globale, gli scambi tra oceani ed atmosfera ammontano a circa 90 GtC anno⁻¹ nelle due direzioni.

Gli oceani possono assorbire grandi quantità di CO₂ dall'atmosfera tramite processi inorganici legati alla differenza di acidità tra la CO₂ gassosa (leggermente acida) e l'oceano, leggermente alcalino (Denman *et al.*, 2007). Lo scambio alla superficie è determinato principalmente dal gradiente di concentrazione tra atmosfera ed oceano, ma dipende anche da altri fattori meteorologici, quali precipitazioni, scambio di calore, presenza di ghiaccio o altre sostanze in sospensione.

I dati più recenti di assorbimento di carbonio derivante da emissioni antropogeniche da parte degli oceani sono ben assodati e indicano una media decennale di 2.2 ± 0.5 GtC yranno⁻¹ per gli anni '90, valore che si mantiene sostanzialmente simile anche per i primi cinque anni di questo millennio (Bindoff *et al.*, 2007; Denman *et al.*, 2007). Tra il 1980 ed il 2005, gli oceani hanno assorbito 53±9 GtC, pari a circa il 37% (±7%) delle emissioni di carbonio (Bindoff *et al.*, 2007).

A livello regionale, il rapporto dell'IPCC riporta i seguenti dati (Denman *et al.*, 2007):

- gli oceani tropicali emettono CO₂ in atmosfera (0.7 GtC yranno⁻¹);
- gli oceani dell'emisfero nord assorbono carbonio (1.2 GtC yranno⁻¹, sia naturale che antropogenico);

-l'oceano del sud è un grande assorbitore di CO₂ sia naturale sia di origine antropogenica, per circa 1.5 GtC anno⁻¹.

L'aumento di concentrazione atmosferica di CO₂, associato a cambiamenti sulle proprietà chimico-fisiche oceaniche possono influenzare significativamente i cicli biogeochimici marini. La concentrazione superficiale di CO₂ degli oceani sta aumentando; questo processo determina l'incremento dell'acidità delle acque e riduce la capacità degli oceani ad assorbire ulteriore CO₂ atmosferica (Bindoff *et al.*, 2007). Inoltre, la risposta degli organismi marini a questa acidificazione non è ben conosciuta e potrebbe causare ulteriori cambiamenti nel ciclo del carbonio oceanico con conseguenze oggi difficili da valutare (Bindoff *et al.*, 2007).

I modelli utilizzati dall'IPCC (Denman *et al.*, 2007) indicano che la frazione di emissioni antropogeniche che sono assorbite dagli oceani diminuiranno se la concentrazione di CO₂ continuerà ad aumentare. Tenendo in considerazione vari parametri, inclusi i cambiamenti climatici, tutti i modelli utilizzati indicano una riduzione dell'assorbimento degli oceani quantificabile tra -14 e -60 GtC per grado di aumento di temperatura. Questo fenomeno causerebbe di conseguenza un *feedback* climatico positivo (aumento del riscaldamento).

Recentemente, come già evidenziato in precedenza, è stato osservato un declino dell'efficienza di assorbimento dei serbatoi naturali (oceani ed ecosistemi terrestri) di circa il 10% (Canadell *et al.*, 2007). Una parte di questo declino può essere attribuito ad una diminuzione dell'efficienza di assorbimento degli oceani del Sud, avvenuta negli ultimi 20 anni. La diminuzione sono state messe in relazione con l'aumento di ventilazione intorno all'Antartide che incrementa gli scambi con acque profonde ricche di carbonio. Queste dinamiche sono state attribuite, secondo alcuni autori (Canadell *et al.*, 2007; Le Quéré *et al.* 2007), agli stessi cambiamenti climatici e pertanto ci evidenziano, ancora una volta, quanto sia complessa la questione.

2.1.5 Biochar: definizioni e potenzialità.

Il *Biochar* è il carbone a grana fine, ricco di carbonio derivato dalla pirolisi della biomassa legnosa. La pirolisi è la decomposizione termica diretta in assenza di ossigeno e può produrre, con opportune tecnologie, prodotti solidi (il *Biochar*), liquidi (bio-olio) e gassosi (il Gas sintetico o syngas). La resa della pirolisi varia a seconda delle condizioni (Wikipedia, 2009).

In fondo, si può considerare che il *Biochar* sia la versione aggiornata della produzione di carbone fatta nelle aie carbonili sino ai giorni nostri dopo la guerra. Attualmente, si sta cercando di aggiornare la tecnica con sistemi di diversa dimensione, sia portatili

sia su scala aziendale, anche per ottenere contemporaneamente i tre prodotti. Il bio-olio può essere usato in una bio-raffineria dove composti chimici di valore (additivi, prodotti farmaceutici, pesticidi naturali) vengono estratti, mentre il residuo può essere trasformato in carburante o convertito in syngas. La produzione di *Biochar* con sistemi moderni, combinata con quella derivata di bio-carburanti, è un processo esotermico che produce una quantità di energia tra 3 e 9 volte di quella utilizzata e, per questo, rimuove CO₂ dall'atmosfera e può contribuire alla ricostruzione dei *sink* geologici di carbonio (Lehmann *et al.* 2006).

Il *Biochar* può essere utilizzato come ammendante del suolo per creare suoli tipo la terra preta (*dark earth*) tropicale (Sombroek, 1992; Sombroek *et al.* 2003). In effetti, i primi ad utilizzare questa tecnica sono stati i nativi di epoca Pre-colombiana in Amazzonia, che, allo scopo, usavano bruciare i residui agricoli in buche o trincee (Wikipedia, 2009).

L'uso del *Biochar* è considerato una forma potenziale di cattura e immagazzinamento del carbonio (*carbon capture and storage*). Infatti, essendo solido e ricco di carbonio, può essere usato per incrementare lo stock di carbonio nei suoli. Il carbonio da *Biochar* può permanere nel suolo per centinaia o migliaia di anni, potendo quindi costituire un mezzo di riduzione del riscaldamento globale. Indagini effettuate nei suoli dell'Amazzonia, hanno rivelato la presenza di grandi quantità di *black carbon* (*Biochar*) rimasti dopo l'abbandono dei terreni, avvenuta migliaia di anni fa (Sombroek *et al.*, 2003).



Figura 2.4 Le emissioni di anidride carbonica e dei gas serra risultano particolarmente elevate nell'ambito delle grandi aree metropolitane (Buenos Aires – Argentina).

La stima sui tempi di residenza varia tra 100 e 10000 anni, ma 5000 anni è un valore comunemente riportato (Lehmann *et al.*, 2006; Wikipedia, 2009). Il tempo di residenza del *Biochar* nel suolo dipende dal materiale di partenza, della sua carbonificazione, dal rapporto superficie/volume delle particelle e dalle condizioni del suolo nel quale si trova o viene aggiunto (Lehmann *et al.*, 2006; Chih-Hsin *et al.*, 2008). Inoltre, esperimenti di laboratorio indicano che la mineralizzazione delle particelle di *Biochar* diminuisce con l'aumentare della temperatura di carbonificazione; un controllo ottimale del processo di produzione può quindi aumentare ulteriormente il tempo di residenza del carbonio da *Biochar* nei suoli

La conversione di biomassa in *Biochar* porta ad un sequestro di circa il 50% del carbonio iniziale. Per confronto, l'incendio di biomasse in condizioni aerobiche determina il sequestro di solo il 3% del carbonio, mentre la decomposizione naturale ha un'efficienza del 10–20% dopo 5-10 anni (Lehmann *et al.* 2006).

In alcuni casi, l'aggiunta di *Biochar* al suolo può determinare l'accelerazione della mineralizzazione della sostanza organica presente in precedenza (Wardle *et al.*, 2008). Senza considerare le eventuali ricadute ecologiche di questo, va segnalato che, in ogni caso, questo effetto tenderebbe a ridurre, ma non ad annullare il sequestro di carbonio dovuto al *Biochar*. Bisogna inoltre considerare che le condizioni dei suoli per i quali si suggerisce l'apporto di *Biochar* sono usualmente suoli fortemente degradati in condizioni tropicali o sotto forte uso agricolo e non suoli già normalmente ricchi di sostanza organica ed in condizioni naturali (Wikipedia, 2009). Ad esempio, se le attuali procedure di conversione di superfici forestali ad agricole nei paesi tropicali passassero dall'approccio "taglia e brucia" (*slash and burn*), che degrada fortemente i suoli e causa forti immissioni di CO₂ in atmosfera, ad un approccio "taglia e carbonifica" (*slash and char*), si potrebbe ridurre le emissioni di carbonio dovute ai cambiamenti di uso del suolo del 12% (0.21 PgC, Lehmann *et al.* 2006). Inoltre, l'aggiunta del *Biochar* al suolo ne migliora molte, se non tutte, le caratteristiche agronomiche, rendendolo più adatto alle colture agricole anche nel tempo, limitando ulteriori azioni di "taglia e brucia" e, di conseguenza, contribuendo alla salvaguardia della foresta tropicale.

In ogni caso, perché il processo sia sostenibile e costituisca realmente una forma di cattura e immagazzinamento del carbonio, è cruciale che il materiale utilizzato venga da biomasse altrimenti gestite come residuo (ad esempio i residui colturali agricoli o forestali) o da coltivazioni ad hoc, ma con gestione ecocompatibile, possibilmente su terreni degradati da migliorare anch'essi con l'aggiunta di *Biochar*.

I sistemi produttivi agro-forestali sono caratterizzati da notevoli quantità di residui in seguito ad utilizzazioni, diradamenti, operazioni di segheria, coltivazioni agricole. Andrebbero considerati anche i residui di biomassa legnosa in città. In Tab. 2.2 (Lehmann *et al.*, 2006) sono riportati le quantità globali dei più comuni tipi di residuo, la loro disponibilità e idoneità all'uso per la produzione di *Biochar*.

Tipo di Residuo	Disponibilità	Idoneità	Produzione potenziale globale di biochar (Pg anno ⁻¹)
Residui forestali	Media	Alta	0.04
Residui di segheria	Alta	Alta	0.05
Lolla di riso	Alta	Media	0.04
Residui di frutta secca	Alta	Alta	0.002
Rifiuti urbani	Alta	Alta	0.03
Totale			0.162

Tabella 2.2 Potenzialità produttive di residui agroforestali (da Lehmann *et al.*, 2006).

Va comunque considerato che la mera applicazione di *Biochar* al suolo non costituisce, di per sé, una riduzione netta delle emissioni o un aumento del sequestro del carbonio, dato che il *Biochar* si accumulerebbe comunque anche se non aggiunto al suolo. Tuttavia, qualora il *Biochar* sia utilizzato in uno schema di sostituzione di combustibili fossili, per la produzione di energia, l'uso del carbone da biomasse determinerebbe una riduzione delle emissioni, mentre l'uso del *Biochar* costituirebbe un sequestro netto (Lehmann *et al.*, 2006). Va inoltre considerata l'eventuale produzione addizionale di biomassa vegetale (agricola o da piantagione forestale) che potrebbe realizzarsi in suoli migliorati dall'aggiunta di *Biochar*. Tutto questo richiede una produzione sostenibile di biomasse agro-forestali che eviti la degradazione del suolo e non determini effetti collaterali durante la coltivazione.

In conclusione, va comunque segnalato che i progetti per la produzione di *Biochar* sono limitati e non hanno ancora un impatto significativo sul bilancio del carbonio. La tecnica è comunque promettente, già pronta all'uso su diversa scala ed è già considerata tra gli approcci di geo-ingegneria per la riduzione delle emissioni (Wikipedia, 2009).



Figura. 2.5 I mari e gli oceani costituiscono un grosso serbatoio per l'assorbimento dell'anidride carbonica (Mar Mediterraneo – Malta).



3

Foreste e mitigazione atmosferica

Giuseppe Scarascia Mugnozza, Giorgio Matteucci

3.1 Impatto dei cambiamenti climatici sulle foreste

Come è stato evidenziato nel capitolo precedente, le modificazioni della composizione atmosferica possono agire sulla biosfera, e pertanto sugli ecosistemi terrestri e sulle foreste, sia indirettamente che direttamente. La biosfera può, infatti, risentire dell'impatto dei cambiamenti climatici innescati dall'aumento dell'effetto serra ma, parallelamente, viene anche influenzata direttamente dall'aumento della concentrazione di CO₂ che è il substrato principale dell'assimilazione fotosintetica. Questo processo può costituire un fattore di mitigazione dei cambiamenti ambientali, almeno in termini di cicli biogeochimici e di chimica atmosferica.

Il ciclo di vita delle foreste, tipicamente medio-lungo, le rende particolarmente suscettibili ai cambiamenti climatici ma, allo stesso tempo, consente di utilizzare questi ecosistemi per studiare quali effetti dei cambiamenti siano già in atto.

In effetti, gli alberi stanno già testimoniando i cambiamenti in atto. A questo proposito, una recente analisi di serie storiche di dati biologici legati agli andamenti di temperatura provenienti dall'emisfero boreale, basata soprattutto su serie dendrologiche ha evidenziato come ci siano stati periodi freddi (*Piccola era glaciale*, 1580 – 1850) e caldi come il *Periodo caldo medievale* (890 – 1170) e la fase centrale e finale del XX secolo, ma che quest'ultimo periodo rappresenti la più significativa e duratura anomalia climatica (Osborn e Briffa, 2006). Inoltre, la comparazione di questi dati con quelli strumentali indica che la dimensione spaziale del riscaldamento attuale è molto più ampia e distribuita che nel passato, segnalando quindi la generalità del cambiamento.

Ci si può quindi chiedere quale possa essere l'effetto di questi cambiamenti, già avvenuti, sui processi degli ecosistemi forestali.



Figura 3.1 Aree sperimentali in un parco urbano per lo studio dei cambiamenti climatici.

In linea generale, sono diversi gli studi che hanno messo in evidenza l'effetto tendenzialmente positivo di questi cambiamenti su una buona parte degli ecosistemi forestali. In una analisi dei dati provenienti da foreste gestite, Boisvenue e Running (2006) hanno trovato che ben il 75% dei circa 50 studi che riportavano dati sulla produttività forestale indicavano un *trend* di crescita positivo, mentre solo 5 (10%) avevano verificato un andamento negativo (gli altri riportavano dati non univoci). Questo *trend* è confermato anche da dati inventariali a livello europeo (Spiecker *et al.*, 2002) e da risultati provenienti da un'analisi di dettaglio, che ha utilizzato sia dati inventariali sia approcci modellistici per la regione tedesca della Turingia (Vetter *et al.*, 2005). Quest'ultimo studio ha trovato come i cambiamenti ambientali abbiano indotto, negli ultimi venti anni, un aumento dell'accumulo di biomassa in tutte le classi di età degli alberi presenti. I risultati ottenuti da dati da satellite e dall'applicazione di modelli, hanno dimostrato che la produttività primaria netta a livello globale è cresciuta di circa il 6% tra il 1982 ed il 1999, mentre quella delle regioni tropicali e temperate settentrionali ha mostrato aumenti sino al 20% (Nemani *et al.*, 2003). Questi aumenti sono stati attribuiti soprattutto al riscaldamento della temperatura che rappresenta un fattore limitante per la crescita in molte regioni e che ha causato l'allungamento della stagione vegetativa delle piante e la conseguente possibilità di incremento della biomassa.

In relazione a questo ultimo processo, sono diversi gli studi che hanno riportato una variazione della stagione vegetativa, sia partendo da dati fenologici provenienti da esercizi a scala europea (Menzel *et al.*, 2001) sia da modellizzazioni sulla base dei parametri climatici (Schwartz *et al.*, 2006) sia, infine, da dati acquisiti attraverso rilevamento satellitare (Piao *et al.*, 2006). Queste osservazioni hanno segnalato variazioni della stagione vegetativa, soprattutto per anticipi della fase primaverile, da 0.12 a 0.43 giorni anno⁻¹ (anni 1995-2000, Schwartz *et al.*, 2006; Menzel *et al.*, 2001) sino ad 1.16 giorni anno⁻¹ per il periodo 1982-1999 nelle zone temperate della Cina (Piao *et al.*, 2006). Rispetto a questi dati, va segnalato che, mentre l'anticipo della fase primaverile sembra avere un effetto generalmente positivo sul bilancio del carbonio degli ecosistemi terrestri (Nemani *et al.*, 2003), il ritardo della chiusura autunnale può determinare effetti controversi, con, ad esempio, la perdita di carbonio negli ecosistemi boreali (Ciais, comunicazione personale, 2007).

E' abbastanza difficile identificare con certezza quali siano i fattori che sono alla base dell'aumento di produttività delle foreste (Biosvenue e Running, 2006). Nello studio a scala regionale di Vetter e colleghi, già menzionato, la variazione di produttività è stata



Figura 3.2 Produzioni vivaistiche per alberi da utilizzare nel verde urbano

attribuita per il 50% ad effetti diretti della gestione forestale, per il 33% agli effetti “indiretti” causati dall’uomo (aumento CO₂ e temperatura, deposizioni azotate) e per l’8-17% ad effetti storici legati alla dinamica delle classi di età degli alberi (Vetter *et al.*, 2005). Questi fattori possono avere un’importanza relativa diversa nelle varie regioni del globo. Un’analisi modellistica ha indicato come il fattore gestionale e la storia di uso del suolo siano preminenti per le foreste temperate, causando sino al 100% della variazione di produttività, mentre la fertilizzazione da CO₂ sia quasi totalmente responsabile dell’effetto sulle foreste tropicali e sino al 50% dell’effetto sulle foreste boreali (Ciais *et al.*, 2005b). D’altro canto, sperimentazioni su ecosistemi forestali tramite sistemi di arricchimento in aria libera a concentrazioni di CO₂ pari a quelle che dovrebbero aversi nel 2050 (550 ppm) hanno mostrato come la produttività primaria sia sistematicamente maggiore nei trattamenti arricchiti rispetto a quelli in condizioni ambientali attuali (Norby *et al.*, 2005). Infine, tra le cause dell’aumento della produttività, un recente studio ha evidenziato l’importanza fondamentale della deposizione azotata, causata dall’inquinamento atmosferico di ossidi di azoto (NO₃) e di ammoniaca (NH₄), nel determinare l’assorbimento di carbonio netto medio sul ciclo di rotazione di impianti forestali gestiti (Magnani *et al.*, 2007), rivedendo stime più prudenziali precedentemente riportate (Nadelhoffer *et al.*, 1999).



Figura 3.3 Piantagioni forestali per lo studio degli accrescimenti in funzione del cambiamento climatico.

I dati indicativi di effetti tendenzialmente positivi dei cambiamenti globali sono quasi tutti riferiti a scale regionali, globali o a singoli studi in cui gli ecosistemi di aree sottoposte a stress da secco o caldo sono sottorappresentati (Boisvenue e Running, 2006). La risposta di questi ecosistemi ai cambiamenti globali è in generale diversa rispetto ad ecosistemi di aree più favorevoli e, in termini di produttività, può essere minore o addirittura negativa. Gli ecosistemi mediterranei sono tra quelli più suscettibili al riscaldamento globale (Schröter et al., 2005). Sono già stati segnalati effetti negativi sulla produttività al limite meridionale dell'areale del faggio (Jump et al., 2006)..

Misure continue e di lungo termine di scambio di carbonio a scala di ecosistema mediante la tecnica di *Eddy Covariance* (vedi in seguito per la descrizione della metodologia) sono in grado di rivelare variazioni nel ciclo del carbonio dovute ad eventi anomali o ad annate particolarmente calde e siccitose. Eventi come quello verificatosi nell'estate del 2007 sono in grado di limitare fortemente l'assorbimento netto di carbonio di ecosistemi mediterranei. E' il caso di quanto si è verificato in una pineta della Sila Greca (Fig. 3.5) che, nel 2007, a inizio settembre mostrava valori di accumulo estivo tra il 20 ed il 30% e comunque inferiori rispetto al 2005 e al 2003-2004. Dati simili sono stati riscontrati anche nella faggeta abruzzese di Collelongo nel 1993 (Valentini *et al.*, 1996), 2000 (Scarascia Mugnozza *et al.*, 2002) e 2007 (dati non pubblicati).



Figura 3.4 Sistema sperimentale mobile per la misura della CO₂.

Nel 2007, i dati di trasparenza delle chiome, sintomo di stress per la vegetazione, per l'Italia Centrale, provenienti dalla rete di monitoraggio CONECOFOR, hanno superato, per la prima volta, la soglia critica del 25% (Pettriccione, comunicazione personale, 2007). L'impatto delle ondate di calore può esplicarsi anche a scala subcontinentale, causando diminuzioni di produttività sino al 30% con effetti anche sulla concentrazione atmosferica di CO₂ (Ciais *et al.*, 2005a).

La temperatura è uno dei fattori principali che determina la distribuzione della vegetazione sulla terra (Woodward, 1987). Il riscaldamento globale quindi può esercitare una pressione selettiva, causando spostamenti e anche estinzioni di specie. Questo processo sta già avvenendo sia per il regno animale che per quello vegetale (Parmesan e Yohe, 2003).

Peraltro, l'incertezza legata alla risposta degli ecosistemi terrestri alle nostre latitudini è accentuata dalla possibilità che eventi catastrofici come gli incendi forestali possano aumentare nel futuro, sia in numero sia in potenziale distruttivo. Quanto avvenuto nel nostro Paese nell'estate del 2007 può costituire un esempio. Infatti, sebbene la quasi totalità degli incendi sia stata determinata dall'uomo, l'enorme aumento di superficie forestale distrutta è da mettere in relazione alle condizioni di siccità che hanno facilitato sia l'accensione sia la diffusione del fuoco. Va segnalato che dinamiche simili sono state riportate anche in aree boreali, dove, in anni siccitosi, il numero e l'entità degli incendi è risultata maggiore che in annate più umide, anche in foreste pressoché vergini (Mollicone *et al.*, 2006).

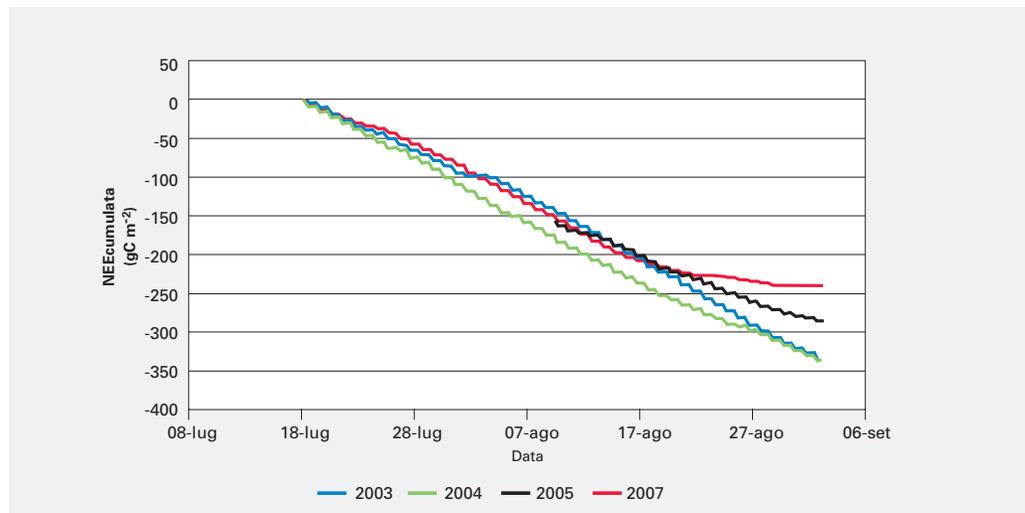


Figura 3.5 Andamento cumulato dello scambio netto di carbonio (NEE, gC m⁻²) in una pineta di *Pinus nigra* Var. Laricio nella Sila Greca. I valori partono dal 18 luglio. I dati di tutti gli anni non comprendono la componente di *storage* che, da un'analisi preliminare, risulta comparabile tra le annate di misure.

3.2 Fertilizzazione carbonica e risposta degli ecosistemi

A livello fogliare il processo che prima di altri risente dell'alterazione della concentrazione di CO_2 è ovviamente la fotosintesi; la CO_2 rappresenta, infatti, il substrato di questo processo biochimico ma regola anche l'attività del principale enzima, la Rubisco (Ribuloso bifosfato carbossilasi) che serve appunto a catturare la CO_2 e ad assimilarla in composti organici. Il risultato, però, corrisponde alle ipotesi attese, solo parzialmente. La fotosintesi a livello fogliare (per unità di superficie fogliare) nella gran parte delle specie forestali studiate subisce sì un aumento del 50-100%, grazie all'inibizione del processo di fotorespirazione, in risposta all'incremento di CO_2 da 360 ppm a 710 ppm, ma nel passato si è anche osservato un certo grado di acclimatazione alle nuove condizioni atmosferiche. Questo processo può richiedere mesi, o qualche anno, per manifestarsi per cui vi è l'esigenza di condurre esperimenti per periodi di tempo piuttosto lunghi. L'acclimatazione consiste in un aggiustamento verso il basso della capacità fotosintetica delle piante per cui dopo un certo intervallo temporale la fotosintesi ad alta CO_2 si stabilizza su livelli non significativamente differenti da quelli di partenza, in condizioni di CO_2 normali. Le spiegazioni di un tale fenomeno possono essere diverse e hanno coinvolto le limitazioni indotte da eccessive disponibilità di assimilati, ovvero carboidrati, che le piante, in determinate condizioni ambientali e di allevamento, non riescono ad utilizzare pienamente per la crescita; un'altra spiegazione, però, fa riferimento alla riduzione da parte della pianta dell'investimento di risorse nutritive (azoto) in proteine ed enzimi, quali la Rubisco, in condizioni ambientali in cui si ha contemporaneamente un eccesso di CO_2 per la fotosintesi e ridotta disponibilità di elementi nutritivi. In realtà le ricerche successive su alberi ed ecosistemi nell'ambiente naturale, soprattutto quelle condotte su tempi più lunghi, almeno per 5-10 anni, hanno dimostrato che l'acclimatazione della fotosintesi ad alta CO_2 spesso non è altro che un artefatto dovuto all'allevamento di piante ed alberelli in condizioni controllate, con limitazioni dello spazio fisico, soprattutto a livello di apparati radicali. Queste scoperte dimostrano, tra l'altro, l'importanza nella ricerca forestale della scelta di adeguati sistemi sperimentali per affrontare le diverse questioni scientifiche che vengono poste. Non si può però scartare del tutto l'ipotesi dell'insorgenza dell'acclimatazione fotosintetica nel caso in cui gli alberi e gli ecosistemi crescano in condizioni ambientali limitanti.

Altre importanti funzioni fisiologiche hanno luogo a livello di copertura fogliare e comprendono gli scambi di vapor d'acqua con l'atmosfera e la regolazione stomatica di tutti gli scambi gassosi, in entrata e in uscita delle foglie. Poiché la funzione degli stomi è quella di ottimizzare il guadagno (ingresso) di CO_2 in presenza di una perdita inevitabile di acqua per traspirazione, in un'atmosfera arricchita di CO_2 il loro numero (indice stomatico) e il loro grado medio di apertura (conduttanza) dovrebbero ridursi. Pur se con notevoli differenze in funzione delle specie e della variabilità genetica interspecifica,

si è generalmente osservato una riduzione della densità stomatica e dell'indice stomatico (numero di cellule stomatiche normalizzato per il numero di cellule dell'epidermide fogliare) e della conduttanza stomatica pari al 10-20%.

E' interessante sottolineare che la riduzione del numero di stomi è stata osservata in esperimenti di durata relativamente lunga pari a circa alcuni anni su diverse specie forestali, ma anche da osservazioni condotte su materiale da erbario sfruttando il fatto che la modificazione del livello di CO₂ atmosferica si è già verificato nell'arco di quasi due secoli. In realtà autori stranieri (Woodward, 1987) e italiani (Paoletti e Gellini, 1993) hanno confrontato il materiale d'erbario raccolto secoli fa, prima dell'era industriale, con foglie delle stesse specie raccolte in questi anni, dimostrando che anche in natura, su periodi lunghi di tempo, le foglie tendono a ridurre la presenza delle strutture destinate a regolare gli scambi gassosi con l'atmosfera.

Questo fenomeno ha fatto sorgere conseguentemente un gran numero di domande sulle conseguenze, non solo fisiologiche, ma anche ecologiche, della riduzione delle perdite traspirative che ne può conseguire. In realtà la traspirazione fogliare viene sì ridotta, ma in misura molto modesta, effetto che può essere anche annullato da altri fattori e processi che interagiscono con la traspirazione, come l'aumento della superficie fogliare determinato dalla maggiore disponibilità di carboidrati nelle piante cresciute ad alta CO₂.

Ad ogni modo, come ci si poteva anche ragionevolmente aspettare, il parametro che aumenta in tutti gli alberi forestali, indipendentemente dalla specie, dallo schema sperimentale e dall'età delle piante, è l'efficienza di traspirazione e cioè il rapporto tra carbonio organico con la fotosintesi per quantità unitaria di acqua persa per traspirazione. L'aumento di efficienza va dal 50 fino al 200% a seconda della specie forestale e delle condizioni ambientali.

Come si traduce in termini di crescita a produzione di biomassa arborea la maggiore efficienza fotosintetica e traspirativa osservata negli alberi cresciuti a CO₂ elevata?

Nell'esperimento EuroFACE condotto in Italia, l'unico riguardante alberi forestali in Europa, su una piantagione di diverse specie di pioppi, la produttività primaria netta annuale durante il primo ciclo culturale è stata calcolata come la sommatoria degli incrementi di biomassa legnosa, di produzione di fogliame e di investimento nelle radici. La produttività per i tre genotipi studiati, alla fine dei tre anni del ciclo culturale è aumentata nel trattamento ad alta CO₂ del 20-36%, rispetto al controllo (Scarascia-Mugnozza *et al.*, 2006).

3. Foreste e mitigazione atmosferica



Figura 3.6 Esperimenti di manipolazione di ecosistemi con livelli elevati di CO₂ atmosferica (FACE, free air carbon enrichment).

Su base relativa, la produzione delle radici fini era molto più stimolata ad alta CO₂ che non le altre componenti della produttività primaria netta soprattutto in *P. nigra* e *P.x euramericana*. Comunque l'incremento della componente legnosa epigea rappresenta circa il 67%, 53% e il 61% per *P. alba*, *P. nigra* e *P.x euramericana*, rispettivamente, in rapporto all'aumento totale di produttività. Si può quindi affermare che l'aumento della CO₂ atmosferica può ulteriormente espandere la potenzialità di sequestro di carbonio da parte delle piantagioni forestali sia nella componente epigea sia in quella ipogea. Comunque particolare attenzione deve essere indirizzata ai processi pedologici e alle loro dinamiche poiché, come suggerisce questo nostro esperimento, la fissazione di carbonio nei diversi comparti del terreno si modifica col tempo.

L'aumento di produttività osservato con la piantagione di pioppi in Italia è in completo accordo con i dati ottenuti da esperimenti simili condotti con infrastrutture simili in Nord America (Fig. 3.6); questi esperimenti hanno riguardato altri tipi di piantagioni forestali, di età compresa tra 3 e 20 anni e costituite da specie molto diverse tra loro come *Pinus taeda*, *Populus tremuloides*, *Acer saccharum*, *Betula papyrifera* e *Liquidambar styraciflua*. L'analisi combinata dei risultati di tutti questi esperimenti, americani e europei, ha dimostrato che, in Nord America e in Europa pur con specie e in condizioni climatiche molto diverse tra loro, la risposta di ecosistemi forestali ad un aumento della CO₂ a 550 ppm (30% di aumento rispetto alle condizioni atmosferiche attuali) è costante intorno al 20-25% (Norby *et al.* 2005). Queste informazioni sono importanti per validare le risposte dei modelli di simulazione e previsione sull'impatto dei cambiamenti ambientali.

3.3 Quali strategie forestali per contrastare il "Global Change"

Affrontare i problemi e gli impatti determinati dai cambiamenti ambientali a scala globale richiederà, anzi sta già richiedendo, una riorganizzazione profonda delle società umane, nelle varie regioni del pianeta. Due strategie di carattere generale dovranno essere studiate e messe in atto, sicuramente in modo integrato fra loro: la mitigazione dei cambiamenti ambientali e l'adattamento ai loro effetti. La mitigazione riguarda l'attenuazione dell'ampiezza dei mutamenti mediante la riduzione degli squilibri nel bilancio dei gas serra tra emissioni e capacità di assorbimento; in breve, misure energetiche e industriali di riduzione delle emissioni di carbonio così come l'ampliamento delle potenzialità di sequestro di carbonio da parte della biosfera sono misure che rientrano nella categoria delle iniziative di mitigazione. Se allarghiamo la nostra visuale anche all'insieme dei gas ad effetto serra e delle altre sostanze inquinanti, è fuor di dubbio che nella mitigazione rientrano anche la diffusione della bio-energia e tutte le iniziative riguardanti la capacità

di sistemi biologici, tra cui alberi e foreste, di assorbire inquinanti atmosferici (es. ozono, idrocarburi volatili) così come dal terreno e dall'acqua. L'adattamento ai cambiamenti comprende, invece, tutte quelle iniziative messe in atto per consentire alla società, all'economia e agli ecosistemi naturali e coltivati di continuare a svolgere le loro proprie funzioni in presenza di un clima più o meno modificato e di altri impatti del *global change*. Rientrano nelle strategie di adattamento sia il rimboschimento con specie, ed ecotipi più adatti alle nuove condizioni climatiche come sia la pianificazione di interventi di forestazione urbana e peri-urbana per migliorare il microclima e l'ambiente delle aree metropolitane in via di rapida degradazione. Naturalmente il confine tra mitigazione e adattamento non è sempre chiaro e netto, ma è importante sottolineare come gli alberi e le alberature, l'agro-selvicoltura, le piantagioni forestali e le foreste naturali abbiano enormi potenzialità di impiego in entrambe le strategie che dovranno essere disperate per contrastare le modificazioni dell'ambiente.



Figura 3.7 Espansione del bosco in area alpina su pascoli in fase di sottoutilizzo.

Le Convenzioni sul clima (maggiori informazioni saranno date nei capitoli successivi), sulla biodiversità e sulla lotta alla desertificazione con i loro protocolli di attuazione, in particolare la conferenza di Kyoto e gli accordi che seguiranno nei prossimi anni hanno consentito di individuare tre diversi obiettivi per l'impiego di alberi e foreste per la realizzazione della strategia di mitigazione: la conservazione delle foreste, l'espansione della

superficie forestale e della sua capacità di assorbimento e la sostituzione dei combustibili fossili con le risorse bio-energetiche. La strategia di espansione corrisponde all'aumento della capacità di assorbimento di carbonio mediante l'aumento della superficie delle foreste e delle piantagioni forestali, così come lo stesso obiettivo può essere raggiunto con l'aumento della produttività primaria netta o da una combinazione di entrambi i meccanismi. La superficie forestale è in consistente aumento in gran parte dell'emisfero settentrionale sia per effetto dell'espansione spontanea del bosco sui terreni agricoli abbandonati sia grazie ai rimboschimenti e piantagioni forestali. Nel primo caso la superficie forestale progredisce a un ritmo stimato intorno a 0.5-1% annuo, come misurato nell'Appennino centrale (Pompei, 2006), mentre le piantagioni forestali si espandono di 8.5-10.5 Mha all'anno nel mondo, soprattutto in Cina, India e Brasile (FAO 2001), con interessanti risvolti ambientali poiché:

- i) finalmente si dimostra che il ritmo di riduzione della superficie forestale mondiale può essere rallentato e si può concretamente puntare ad un'inversione di tendenza;
- ii) l'espansione forestale può comportare un aumento del ruolo di *sink* di carbonio da parte dei sistemi forestali;
- iii) una maggiore disponibilità di piantagioni forestali e di biomassa legnosa può alleviare la pressione umana sulle residue foreste naturali, soprattutto su quelle primarie.



Figura 3.8 La Short Rotation Forestry (SRF) di ibridi di pioppo garantisce un'elevata produzione di biomassa.

In particolare, l'aumento di superficie forestale comporta un rapido accumulo di carbonio nella biomassa (ritmi variabili con le specie, ma che si attestano intorno a $1-10 \text{ tC ha}^{-1}\text{anno}^{-1}$), ma anche nel terreno che rappresenta la frazione di C più stabile nel tempo, con intervalli di residenza fino a 300-400 anni. La risposta positiva dell'accumulo di C nel terreno può essere misurata dopo pochi anni dall'avvio della riforestazione se il passaggio riguarda terreni agricoli arabili in transizione verso la copertura forestale; notevoli differenze però esistono a seconda del tipo di copertura forestale e delle specie forestali impiegate. Il processo di accumulo di carbonio in seguito a riforestazione è stato esaminato confrontando numerose ricerche condotte nel mondo (Guo e Gifford, 2002) ed è risultato evidente come il più elevato incremento di C si sia riscontrato passando da terreni agricoli a foreste naturali secondarie (+53%), mentre più limitato, ma sempre positivo era l'incremento di C se si passava ad una piantagione forestale (+18%). Tra le specie forestali, le latifoglie risultano essere sicuramente più efficaci rispetto alle conifere, probabilmente per via della molto più elevata produzione di radici fini che si accumulano poi come lettiera radicale nel terreno. La velocità di accumulo del carbonio nel terreno è ovviamente molto variabile ma valori indicativi prevedono un tasso di incremento di $0.1-0.3 \text{ tC per ettaro all'anno}$ (Paul *et al.*, 2002; Del Galdo *et al.*, 2003). Per quanto riguarda la produttività, è stato messo in evidenza come questa sia in aumento in seguito alle condizioni ambientali per ora favorevoli alla crescita delle foreste.

Accanto all'aumento di assorbimento di C con la riforestazione, un ruolo altrettanto importante può essere svolto dalla gestione delle foreste (art. 3.4) già esistenti, prima del 1990. Per impedire però che alcuni grandi Paesi, ricchi di foreste, impiegarono in modo



Figura 3.9 Impianti di castagno con diversa funzione produttiva (Monte Vulture).

eccessivo la capacità di sequestro di C delle loro foreste è stato posto un limite a questa misura (*cap*), pari al 15% della produttività forestale di un Paese. Nel caso dell'Italia è stato riconosciuto, dopo anni di confronti e solleciti in ambito internazionale, di poter contabilizzare fino a circa 2.5 MtC all'anno di assorbimento di C da parte delle foreste nazionali grazie alla gestione forestale che da solo rappresenta circa il 10% dell'impegno di Kyoto del nostro Paese per un valore a prezzo di mercato dei crediti di carbonio di circa 200 Meuro. Il ruolo delle nostre foreste e piantagioni forestali ai fini del rispetto degli impegni internazionali di protezione ambientale andrebbe quindi sottolineato e adeguatamente riconosciuto a livello istituzionale anche in termini finanziari. Molto però rimane ancora da conoscere e da sperimentare sulle più adeguate forme di gestione selvicolturale per conservare e possibilmente aumentare il carbonio immagazzinato nei diversi comparti degli ecosistemi forestali. Zerva e Mencuccini (2005), nell'ambito del progetto europeo CARBO-AGE, hanno misurato il sequestro di carbonio durante il turno di una piantagione di *Picea sitchensis* nell'Inghilterra del Nord, dalla fase di impianto fino all'età di 40 anni. Inizialmente, dopo le lavorazioni del terreno effettuate per la piantagione, l'ecosistema è diventato una sorgente netta di CO₂ per oltre 10 anni. Solo dopo questo intervallo temporale, il sistema ha ricominciato ad assorbire carbonio, al netto delle perdite di respirazione del suolo e il contenuto di C nel terreno ha ripreso ad aumentare; l'importanza della respirazione del suolo, cioè delle emissioni di carbonio dal terreno per effetto combinato della respirazione radicale e della decomposizione della sostanza organica, in rapporto agli interventi selvicolturali. Questo fenomeno è stato osservato anche nel caso dello studio di una cronosequenza, su un insieme di particelle forestali di età scalare, in un bosco ceduo di *Quercus cerris* in provincia di Viterbo (Valentini *et al.*, 2000).

Un'altra strategia ancora per la mitigazione dei cambiamenti ambientali è quella di sostituire i combustibili fossili con quelli di origine biologica e quindi rinnovabili. La pur ampia letteratura esistente sulla capacità di compensare le emissioni da fonti fossili con l'energia da biomassa, però, spesso non è in grado di quantificare il reale contributo delle biomasse a favore di tale strategia di sostituzione; in un'analisi molto dettagliata dei dati scientifici esistenti, Cannell (2003) ha stimato che nell'Unione Europea una valutazione "realistica" delle potenzialità di sostituzione dei combustibili fossili con coltivazioni energetiche, sia forestali che agricole, va dall'11 al 32% delle emissioni attuali di carbonio.



4

Metodologie per la stima degli assorbimenti di CO₂ da parte dei sistemi forestali.

Angelo Nolè, Alessandro Peressotti, Giorgio Alberti

4.1 Introduzione: i serbatoi forestali di carbonio (*Carbon Sinks*)

Le foreste influenzano in modo determinante il clima a livello globale attraverso scambi di energia, acqua e anidride carbonica (CO₂). In particolare gli ecosistemi forestali contribuiscono al bilancio globale del carbonio attraverso i processi di assimilazione fotosintetica e di respirazione autotrofa ed eterotrofa, andando a mitigare gli effetti dell'aumento della concentrazione dei gas-serra in atmosfera.

Recenti studi hanno stimato che le foreste trattengono circa il 45% del carbonio terrestre, contribuendo per il 50% alla produzione primaria netta della biosfera (Bonan, 2008). Nell'ultimo decennio i processi di sequestro di carbonio hanno portato ad un incremento del *carbon sink* forestale a livello globale pari a 2.6 Pg C anno⁻¹, pari a circa il 33% delle emissioni di origine antropica di CO₂.

In particolare il bilancio del carbonio dei sistemi forestali è rappresentato dalla differenza tra la produttività primaria lorda (GPP, *Gross Primary Production*) che rappresenta la quantità di carbonio assimilata attraverso i processi fotosintetici, e il carbonio che viene rilasciato in atmosfera attraverso i processi di respirazione a livello ecosistemico (Reco, *Respiration of ecosystem*). La respirazione ecosistemica comprende sia la componente di respirazione autotrofa da parte delle piante sia la componente eterotrofa rappresentata dai processi di ossidazione da parte della componente microbica presente nel suolo dei substrati di carbonio che includono le componenti di lettiera superficiale, sotterranea e la sostanza organica del suolo.

Tale differenza rappresenta la produzione ecosistemica netta (NEP, *Net Ecosystem Productivity*). In generale su base annua gli ecosistemi forestali non disturbati mostrano un incremento nello scambio di carbonio con l'atmosfera, e pertanto sono considerati come *sinks*, cioè assorbono attivamente carbonio (NEP>0) (Hyvonen *et al.* 2007). Tuttavia gli ecosistemi forestali possono agire anche come sources rilasciando carbonio in atmosfera quando i processi di respirazione a livello ecosistemico eccedono i processi di assimilazione (NEP<0). Ciò avviene in seguito a fenomeni di disturbo sia di origine antropica sia naturale (tagli, incendi, anomalie climatiche, etc.) che influenzano in modo diretto i processi fotosintetici. Pertanto la quantità di carbonio assimilata e trattenuta sotto forma di biomassa è funzione di un numero elevato di fattori legati alle caratteristiche strutturali e morfologiche delle diverse specie (superficie delle foglie, rapporto tra biomassa ipogea e epigea, etc.), alle caratteristiche del popolamento (densità, distanza tra gli alberi, età, etc.), alle caratteristiche edafiche stagionali e alla disponibilità di luce, di acqua e di nutrienti. È evidente come in un sistema tanto complesso, anche piccole variazioni annuali nelle componenti di assimilazione e respirazione che determinano la NEP, possano portare su scala globale a notevoli ricadute sul bilancio del carbonio e più in particolare sul *carbon stock* (Heimann & Reichstein, 2008).

Negli ultimi decenni la ricerca scientifica ha sviluppato nuovi strumenti per la misura degli assorbimenti di CO₂ da parte dei sistemi forestali e per la previsione nel lungo termine all'interno di un ampio *range* di possibili scenari di cambiamento climatico.

4.1.1 Metodi inventariali

Tra gli obblighi degli Stati contraenti il Protocollo di Kyoto per la riduzione delle emissioni di gas ad effetto serra, vi è la presentazione dell'inventario nazionale delle emissioni e degli assorbimenti dei gas ad effetto serra (*National Inventory Report – NIR*) con riferimento alla serie storica dal 1990. Nei sei settori conteggiati dal NIR, il settore LULUCF (*Land Use, Land Use Change and Forestry*) riporta le stime di assorbimenti e emissioni di gas serra derivanti dalle attività di uso del suolo, cambiamento di uso del suolo e selvicolturali. Nell'ambito del LULUCF il settore forestale rappresenta la parte più rilevante a causa delle dimensioni del *sink* di carbonio forestale e dei flussi relativi alla gestione forestale.

Per quanto riguarda l'Italia, il *sink* forestale, espresso come potenziale nazionale massimo di assorbimento di CO₂, è stato aggiornato nell'ambito della Conferenza delle Parti (COP12 - Nairobi, 2006) e stimato pari a 16,2 Mt CO₂, di cui circa il 60% deriva dalla gestione forestale, mentre il restante 40% è distribuito tra le attività di nuova forestazione e di ricolonizzazione di ex-coltivi e pascoli da parte della foresta.

4. Metodologie per la stima degli assorbimenti di CO₂ da parte dei sistemi forestali.

La contabilizzazione degli assorbimenti di CO₂ con metodi inventariali, si basa principalmente sulla stima delle variazioni degli *stocks* di carbonio nei cinque comparti (*carbon pools*) che costituiscono gli ecosistemi forestali come previsto dalle *Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry* (GPG - LULUCF) (IPCC, 2003): 1. Biomassa aerea (o epigea); 2. Biomassa ipogea; 3. Lettieria; 4. Necromassa legnosa; 5. Carbonio organico nel suolo (Tab. 4.1).

	<p>Biomassa aerea (<i>o epigea</i>), rappresentata da tutta la biomassa vivente sopra il suolo incluso: fusto, ceppaie, rami, corteccia, semi e fogliame.</p>
	<p><i>Biomassa ipogea</i>, tutta la biomassa viva delle radici. Le radici fini (sotto i 2 mm di diametro) sono escluse, poiché queste non possono essere empiricamente distinte dalla sostanza organica del suolo o dalla lettiera;</p>
	<p><i>Lettiera</i>, include tutta la biomassa morta presente sopra il suolo minerale o organico, con un diametro inferiore a di 10 cm. Sono inclusi la lettiera e le radici fini vive, con diametro minore di 2 mm, sono incluse nella lettiera quando queste non possono essere distinte empiricamente;</p>
	<p><i>Necromassa legnosa</i>, include tutta la biomassa legnosa morta non contenuta nella lettiera. La biomassa morta può essere in piedi, a terra o nel suolo. Questa include i tronchi, i rami giacenti al suolo e le radici morte, con diametri pari o superiori a 10 cm;</p>
	<p><i>Carbonio organico nel suolo</i>, include il carbonio organico nel suolo minerale o organico (incluse le torbiere) ad una profondità definita dalla nazione e applicata coerentemente per una serie temporale. Le radici fini vive sono incluse nel carbonio organico del suolo, quando queste non possono essere distinte.</p>

Tabella 4.1 Carbon pools forestali

In particolare per la redazione dell'inventario nazionale delle emissioni e degli assorbimenti dei gas ad effetto serra (APAT, 2008), per quanto riguarda la stima delle variazioni degli *stock* di carbonio per le foreste Italiane è stato utilizzato il modello For-est (Federici *et al.*, 2008) basato sulle metodologie IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) messe a punto per il settore LULUCF, nell'ambito dell'attività di *reporting* per la Convenzione Quadro sui Cambiamenti Climatici delle Nazioni Unite (UNFCCC) (IPCC, 2003). Il modello stima su base annua le variazioni dello *stock* di carbonio nei cinque *pools* che costituiscono gli ecosistemi forestali, utilizzando come *dataset* di *input* i dati e le informazioni relative al primo Inventario Forestale Nazionale (IFN) del 1985, e dai risultati preliminari del secondo Inventario Nazionale delle Foreste e dei Serbatoi di Carbonio (INFC) relativi al 2002. Le stime delle superfici forestali riferite al 1990 sono state ricavate attraverso l'interpolazione lineare tra i dati inventariali del 1985 e del 2002, infine per il periodo 2003 – 2006 le superfici forestali sono state dedotte dalla tendenza relativa al periodo 1985 – 2002.

La provvigione a ettaro (m^3/ha) per il periodo 1990 – 2006, per ciascuna tipologia forestale, è stata quindi stimata partendo dalla provvigione riportata dall'IFN del 1985, e sommando l'incremento corrente annuo, stimato su scala regionale utilizzando come funzione di crescita la derivata della funzione di Richards parametrizzata con i dati delle tavole allometriche italiane. Il diagramma di flusso del modello For-est mostra come dalla provvigione vengono stimate le quantità carbonio stoccate nei *carbon pools* di biomassa epigea, ipogea e necromassa (Fig. 4.1).

Per la stima della biomassa epigea possono essere utilizzati sia metodi diretti sia indiretti. I primi, basati su un approccio inventariale di tipo tradizionale, determinano la biomassa aerea attraverso l'applicazione di relazioni allometriche partendo da rilievi strutturali e dendro-auxometrici del popolamento (diametro, altezza, area basimetrica, età, densità). I metodi indiretti, invece, si basano sull'applicazione di coefficienti empirici come il coefficiente di espansione della biomassa (BEF, *Biomass Expansion Factor*), della necromassa (DEF, *Deadmass Expansion Factor*) e il rapporto *root/shoot* (Tab. 4.2), e i fattori di conversione WBD e FC che rappresentano rispettivamente la densità basale del legno (*Wood Basic Density*) e il rapporto sostanza secca/carbonio (IPCC, 1997).

4. Metodologie per la stima degli assorbimenti di CO₂ da parte dei sistemi forestali.

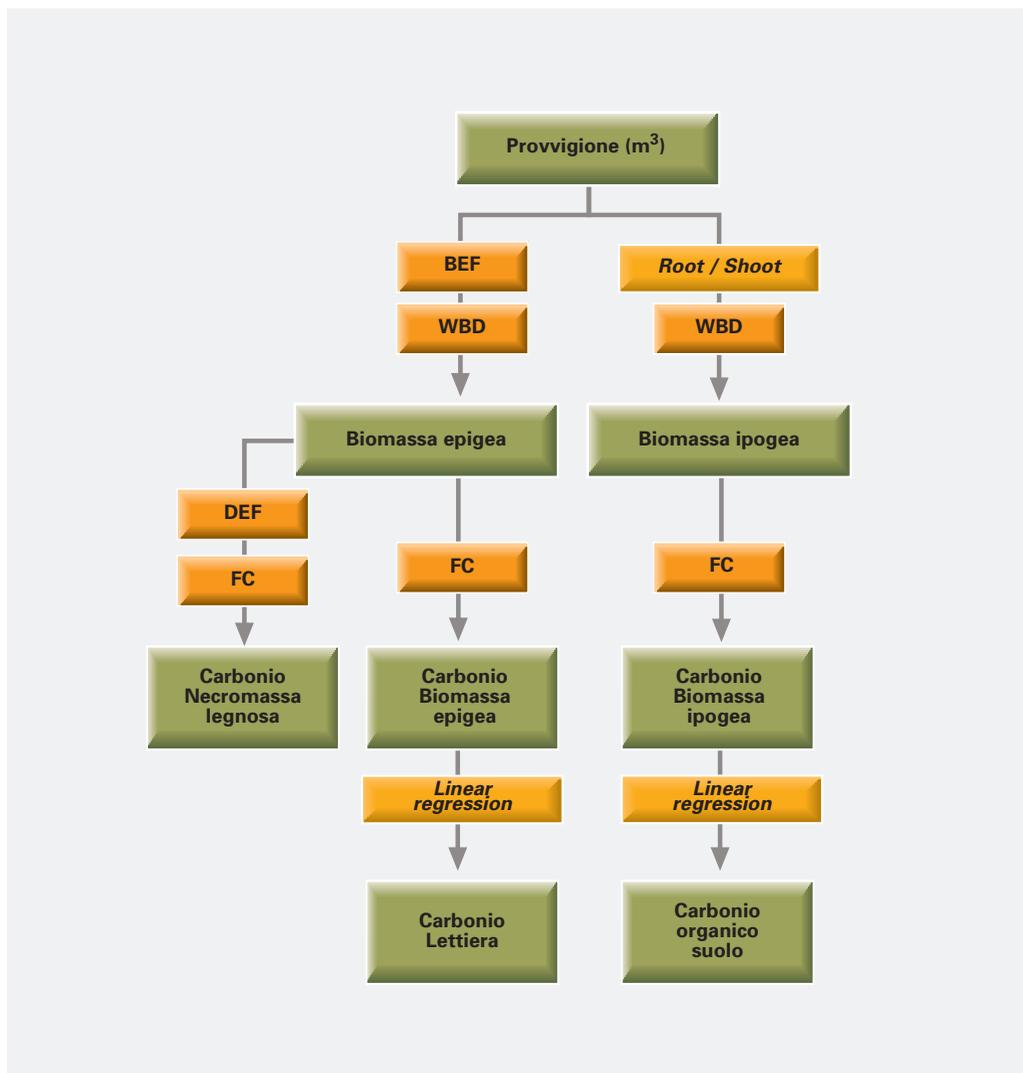


Figura 4.1 Diagramma di flusso Modello *For-est* (Federici *et al.*, 2008).

Nelle Tab. 4.3 e 4.4 sono riportate le quantità di carbonio stoccato dalle foreste italiane e le variazioni dello stock di carbonio per i cinque *carbon pools*, calcolate dal modello For-est relative al periodo 1985 – 2006.

Tipologia	Tipologia inventariale	BEF	Wood Basic Density	R
		volume della biomassa epigea/volume della biomassa utilizzabile	peso secco (t)/volume della biomassa epigea fresca (m ³)	peso della biomassa ipogea/peso della biomassa utilizzabile
Fustaie	Abete rosso	1,29	0,38	0,29
	Abete bianco	1,34	0,38	0,28
	Larice	1,22	0,56	0,29
	Pini montani	1,33	0,47	0,36
	Pini mediterranei	1,53	0,53	0,33
	Altre conifere	1,37	0,43	0,29
	Faggio	1,36	0,61	0,20
	Cerro	1,45	0,69	0,24
	Altre querce	1,42	0,67	0,20
	Altre latifoglie	1,47	0,53	0,24
<i>totale parziale</i>	<i>1,35</i>	<i>0,51</i>	<i>0,28</i>	
Ceduo	Faggio	1,36	0,61	0,20
	Castagno	1,33	0,49	0,28
	Carpino	1,28	0,66	0,26
	Altre querce	1,39	0,65	0,20
	Cerro	1,23	0,69	0,24
	Querce sempreverdi	1,45	0,72	1,00
	Altre latifoglie	1,53	0,53	0,24
	Conifere	1,38	0,43	0,29
<i>totale parziale</i>	<i>1,39</i>	<i>0,56</i>	<i>0,27</i>	
Piantagioni	Eucalitteti	1,33	0,54	0,43
	Altri cedui di latifoglie	1,45	0,53	0,24
	Pioppeti	1,24	0,29	0,21
	Fustaie di altre latifoglie	1,53	0,53	0,24
	Fustaie di conifere	1,41	0,43	0,29
	Altro	1,46	0,48	0,28
	<i>totale parziale</i>	<i>1,36</i>	<i>0,40</i>	<i>0,25</i>
Arbusteti	Foreste rupicole	1,44	0,52	0,42
	Aree ripariali	1,39	0,41	0,23
	Cespuglieti	1,49	0,63	0,62
	<i>totale parziale</i>	<i>1,46</i>	<i>0,56</i>	<i>0,50</i>
Totale		1,38	0,53	0,30

Tabella 4.2 Biomass Expansion Factor (BEF), Wood Basic Density (WBD) e rapporto Root/Shoot (R) per tipologie inventariali (Federici et al., 2008).

4. Metodologie per la stima degli assorbimenti di CO₂ da parte dei sistemi forestali.

Year	Living biomass		Dead organic matter		Soil organic matter	Total
	Aboveground	Belowground	Dead mass	Litter	Soil	
1985	1195445	273629	180432	237858	2296283	4183646
1986	1219454	278155	183507	240877	2331502	4253495
1987	1241906	282299	186357	243926	2365635	4320122
1988	1263786	286372	189130	247061	2399733	4386082
1989	1288949	291217	192312	250061	2435865	4458404
1990	1307136	294627	194425	253141	2468297	4517626
1991	1336836	300486	198270	256090	2506809	4598490
1992	1364584	305907	201852	259086	2544270	4675700
1993	1385098	309730	204595	262246	2576800	4738468
1994	1414023	315450	208465	265223	2614371	4817532
1995	1445453	321838	212575	268160	2653922	4901947
1996	1478567	328579	217010	271103	2694039	4989297
1997	1507848	334508	220890	274093	2731941	5069279
1998	1536363	340190	224707	277042	2768860	5147161
1999	1568504	346799	229142	280018	2808277	5332741
2000	1597791	352703	233178	283057	2845515	5312244
2001	1631400	359586	237801	286044	2885499	5400330
2002	1668344	367203	242900	288986	2927452	5494885
2003	1700073	373692	247282	291995	2966507	5579550
2004	1735805	381056	252229	294992	3008005	5672088
2005	1771367	388414	257127	297971	3049532	5764411
2006	1803549	395100	261601	300992	3088758	5850001

Tabella 4.3 Stock di carbonio nei cinque carbon pools espressi in CO₂ equivalenti (Gg CO₂eq.) (Federici *et al.*, 2008).

Year	Living biomass		Dead organic matter		Soil organic matter	Total
	Aboveground	Belowground	Dead mass	Litter	Soil	
1986	24009	4526	3076	3019	35219	69848
1987	22452	4145	3076	3019	35219	69848
1988	21881	4073	2773	3135	34098	65960
1989	25163	4844	3183	3001	36132	72322
1990	18187	3410	2113	3079	32432	59222
1991	29700	5859	3845	2949	38512	80864
1992	27748	5422	3582	2996	37462	77209
1993	20514	3822	2743	3159	32529	62768
1994	28925	5721	3870	2977	37572	79064
1995	31430	6388	4110	2937	39550	84415
1996	33114	6742	4435	2942	40117	87350
1997	29281	5928	3880	2991	37902	79982
1998	28515	5682	3817	2949	36919	77882
1999	32141	6610	4436	2976	39417	86580
2000	29287	5903	4036	3039	37238	79503
2001	33609	6883	4623	2986	39984	88086
2002	36945	7617	5099	2942	41952	94555
2003	31729	6489	4383	3010	39055	84665
2004	35732	7364	4947	2996	41498	92538
2005	35562	7358	4897	2979	41526	92323
2006	32182	6686	4474	3021	39227	85590

Tabella 4.4 Variazione dello stock di carbonio nei cinque carbon pools espressi in CO₂ equivalenti (Gg CO₂eq.) (Federici et al., 2008).

Infine, nel 2008, è stato istituito dal Ministero dell’Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, in accordo con il Ministero per le Politiche Agricole, Alimentari e Forestali, il “Registro Nazionale dei Serbatoi di Carbonio Agro-Forestali”. Il Registro, in fase di completamento, rappresenta un ulteriore strumento finalizzato alla contabilizzazione degli assorbimenti di carbonio da parte dei sistemi forestali italiani, nell’ambito del settore di uso del suolo, cambiamento di uso del suolo e selvicolturali (*Land Use, Land Use Change and Forestry, LULUCF*), secondo le specifiche tecniche e metodologiche previste dal Protocollo di Kyoto.

Il sistema di contabilità del Registro si fonda sull’Inventario dell’Uso delle Terre d’Italia (IUTI) (Fig. 4.2), che rappresenta la base cartografica e numerica a scala nazionale, per la classificazione nelle sei categorie di uso del suolo (*Settlements, Cropland, Forest Land, Grassland, Wetland, Other Lands*) previste dal UNFCCC (Lumicisi et al., 2008). In tal modo vengono individuate le porzioni del territorio nazionale destinate alla contabilizzazione degli assorbimenti di carbonio secondo le regole previste dal Protocollo di Kyoto per ciascuna classe di uso del suolo, andando a ricostruire le variazioni di superficie forestale nell’ambito di sequenze temporali prestabilite.

4. Metodologie per la stima degli assorbimenti di CO₂ da parte dei sistemi forestali.

Sulla base delle classi di uso del suolo definite dal IUTI, opera l'Inventario degli Stock di Carbonio (ISCI), finalizzato alla contabilizzazione dello stock di carbonio associato alle variazioni di superficie derivanti dai cambiamenti di uso del suolo e dalla gestione selvicolturale delle risorse forestali. L'ISCI viene aggiornato attraverso i dati relativi all'Inventario Nazionale delle Foreste e dei Serbatoi di Carbonio (INFC).

Infine il Registro dei serbatoi di carbonio forestali viene completato con l'Inventario delle Emissioni da Incendi Forestali (IEIF). Sulla base dei dati di superficie, tipologia di vegetazione, informazioni sullo stock preesistente e sull'entità del danno da fuoco forniti dal Censimento degli incendi forestali d'Italia (CIFI), attraverso l'applicazione di appositi fattori di conversione, vengono stimate le emissioni degli altri gas ad effetto serra (N₂O e CH₄) delle superfici forestali bruciate.

Attualmente l'attivazione del Registro è subordinata al completamento dell'INFC relativamente alla fase di stima del contenuto di carbonio per i *pools* di carbonio relativi a lettiera, necromassa e suoli, attualmente oggetto di appositi campionamenti da parte del Corpo Forestale dello Stato. Inoltre risulta ancora in fase di completamento il censimento degli incendi forestali e il relativo inventario delle emissioni dei gas ad effetto serra non-CO₂ (N₂O e CH₄).

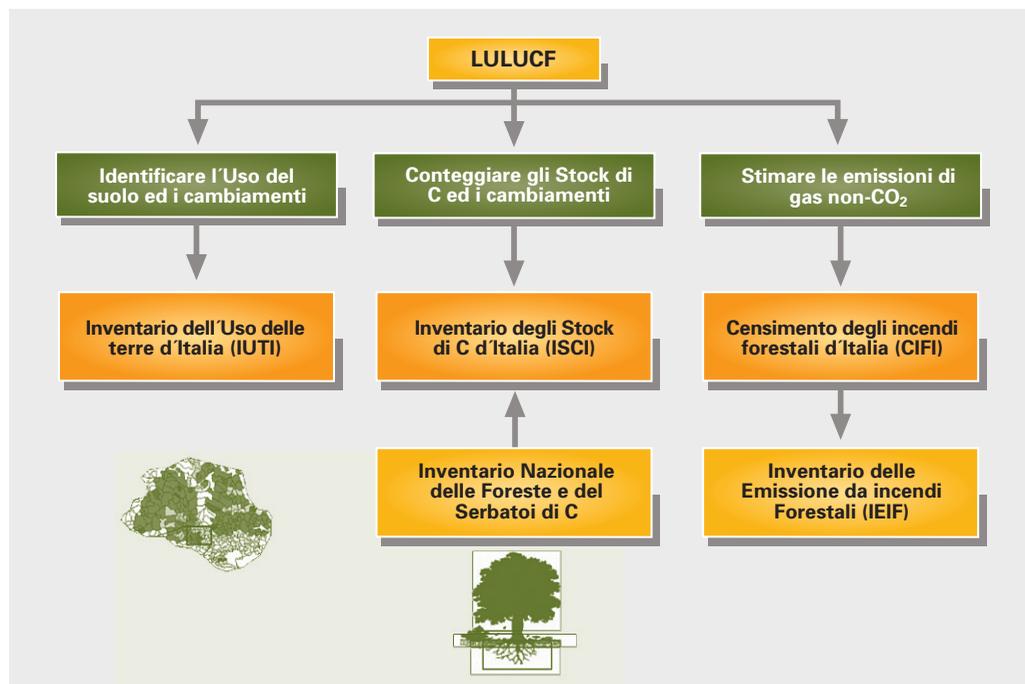


Figura 4.2 Diagramma di flusso del Registro Nazionale dei Serbatoi di Carbonio Forestali (Lumicisi *et al.*, 2008).

4.2 misura dei flussi di CO₂ negli ecosistemi forestali.

4.2.1 Tecnica micrometeorologica della correlazione turbolenta (*Eddy Covariance*)

La tecnica dell'*Eddy Covariance* (EC), basata sulla misura degli scambi netti di carbonio a livello ecosistemico, rappresenta una metodologia di stima del bilancio del carbonio negli ecosistemi forestali in rapida espansione a livello globale. In particolare si tratta di una tecnica micrometeorologica basata sulla misura della turbolenza atmosferica per la stima dei flussi verticali di CO₂ e H₂O nell'interfaccia tra l'atmosfera e la copertura vegetale (Baldocchi, 2003).

Questa tecnica, teorizzata e applicata per la prima volta da Swinbank (1951), per lo studio delle turbolenze e degli scambi di calore ed energia nello strato limite terrestre (*Boundary Layer*), cioè compreso tra la superficie terrestre e l'atmosfera, è stata in seguito utilizzata per la misura degli scambi di CO₂ a livello ecosistemico.

A partire dagli anni settanta lo sviluppo della tecnica *Eddy Covariance* ha seguito di pari passo lo sviluppo tecnologico sia per quanto riguarda il sistema di sensori utilizzati sia per i sistemi *hardware* e *software* di acquisizione dei dati. Negli ultimi 10 anni la tecnica *Eddy Covariance* si è affermata come un valido strumento per la misura degli scambi ecosistemici di CO₂, tanto da essere utilizzata in tutto il mondo; è stato organizzato anche un *network* mondiale denominato Fluxnet (<http://www.fluxnet.ornl.gov>) che coordina *network* regionali (Euroflux, Ameriflux, Asiaflux) che comprende circa 300 siti di misura distribuiti nei diversi biomi terrestri (Fig. 4.3).

Da un punto di vista teorico, la misura degli scambi gassosi tra l'ecosistema e l'atmosfera si basa sulla semplice misura dei flussi in ingresso e in uscita attraverso lo strato limite tra atmosfera ed ecosistema. In particolare lo strato limite si caratterizza per la presenza di moti turbolenti che formano dei vortici (*Eddy*) di varia intensità che determinano il rimescolamento dei gas presenti nell'aria. La misura istantanea delle concentrazioni di CO₂ nell'aria e la direzione del flusso portano alla determinazione del bilancio dello scambio ecosistemico netto (NEE, *Net Ecosystem Exchange*). Per convenzione i flussi di segno positivo indicano un rilascio nell'atmosfera da parte della vegetazione di quantità scalari di CO₂, mentre i flussi di segno negativo corrispondono ad un assorbimento da parte della vegetazione di CO₂ (Greco e Baldocchi, 1996) (Fig. 4.4). L'utilizzo di questa tecnica permette di operare a scala ecosistemica, mediante una stima diretta e non distruttiva. Infatti, la stima puntuale può essere estesa per un'area che può andare da

4. Metodologie per la stima degli assorbimenti di CO₂ da parte dei sistemi forestali.

poche centinaia di metri a diversi chilometri in funzione delle caratteristiche orografiche e climatiche stagionali, quali la direzione predominante del vento e l'intensità. In tal modo viene individuato il cosiddetto *footprint*, cioè l'area che può essere associata al valore di flusso misurato.

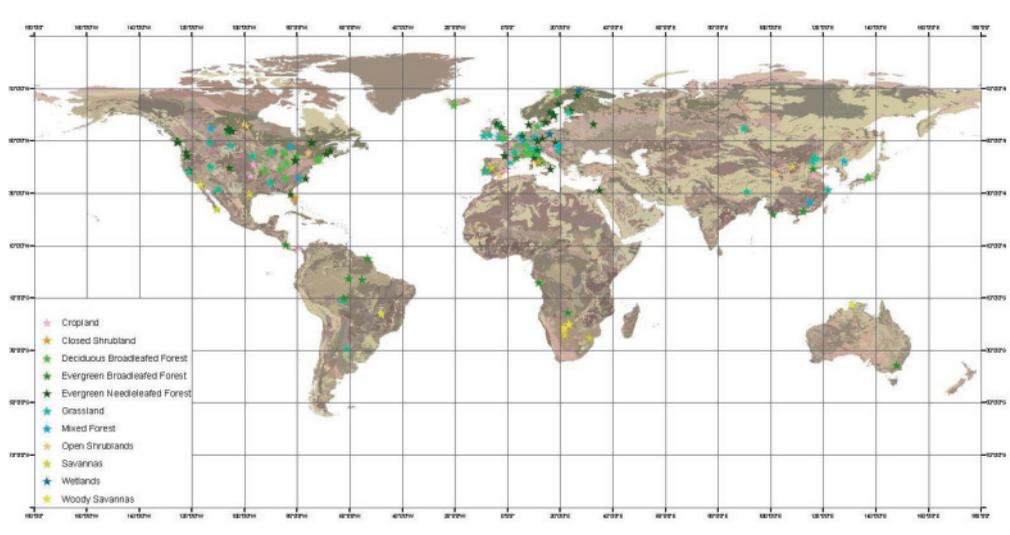


Figura 4.3 Mappa dei siti *Eddy Covariance* appartenenti al *Network globale FLUXNET* (Lumicisi *et al.*, 2008).

La strumentazione utilizzata per le misure viene montata su una torre che sventa al di sopra della copertura arborea, in modo da campionare la composizione dell'aria nell'interfaccia foresta-atmosfera (Fig. 4.5). I due principali strumenti di misura sono l'anemometro sonico e l'*Infrared Gas Analyzer* (IRGA). Il primo misura la velocità del vento nelle tre direzioni; in particolare misura l'effetto della velocità del vento sul tempo di transito degli ultrasuoni in un percorso di lunghezza noto. Gli *Infrared Gas Analyzer* invece hanno il compito di misurare le concentrazioni di CO₂. Oltre a questi due strumenti le torri di misurazione sono equipaggiate con radiometri e

sensori di temperatura e umidità dell'aria, mentre per quanto riguarda il suolo alla base della torre, vengono misurate a diversa profondità temperatura, umidità e densità del flusso di calore del suolo. Uno dei principali limiti della tecnica EC è rappresentata dalla necessità di condizioni di omogeneità spaziale e stazionarietà atmosferica. La prima è riferita alla distribuzione uniforme nel piano orizzontale della vegetazione e all'orografia pianeggiante della stazione, onde evitare perdite per advezione, mentre la seconda condizione è soddisfatta quando il valore medio delle variabili atmosferiche (vento, temperatura, umidità) è stazionario in un intervallo temporale di 60 minuti. Un tipico esempio di errore di misura derivante dalle condizioni atmosferiche è determinato dalla mancanza di moti convettivi o dalla scarsa turbolenza. In ambito forestale tali condizioni atmosferiche generano fenomeni di accumulo notturno della CO_2 (*Storage*) sotto la copertura forestale a causa del basso rimescolamento dell'aria. In questo caso le emissioni durante la fase notturna non vengono rilevate e quindi sottostimate, per poi essere sovrastimate quando nelle prime ore della giornata il riscaldamento dell'aria riattiva i moti convettivi che trasportano verso l'alto elevate quantità di CO_2 .

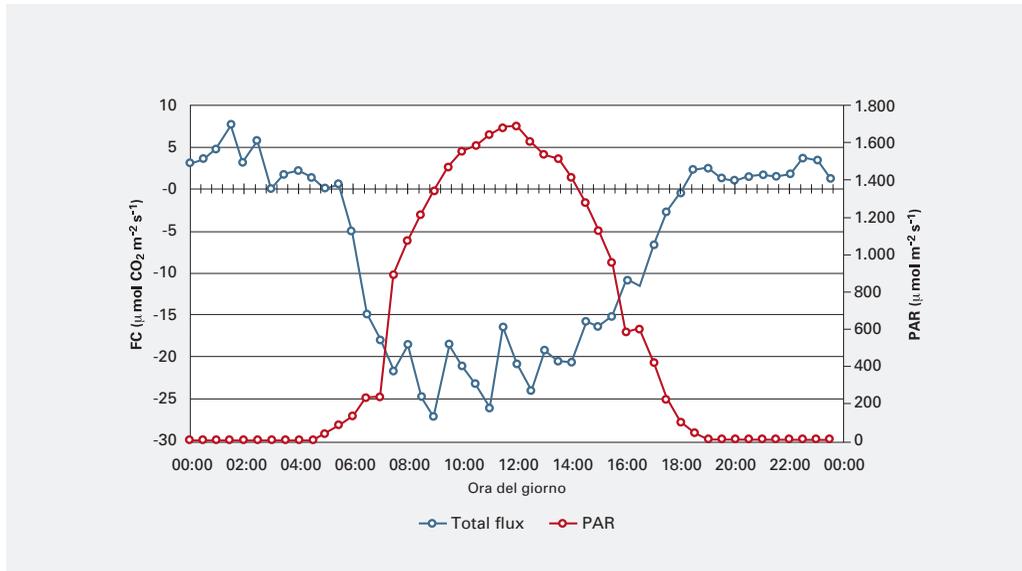


Figura 4.4 Andamento giornaliero degli scambi di CO_2 misurati con la tecnica *Eddy Covariance* in una pineta di pino laricio in Calabria. I valori di scambio netto di CO_2 (FC) sono riportati sull'asse delle ordinate di sinistra, mentre i valori di radiazione fotosinteticamente attiva (PAR) sull'asse di destra (da Marino *et al.*, 2005).

4. Metodologie per la stima degli assorbimenti di CO₂ da parte dei sistemi forestali.



Figura 4.5 Torre di misura *Eddy Covariance*.

4.2.2 Modelli di processo su base funzionale

Tra le metodologie sviluppate negli ultimi anni per la stima dei *carbon sinks* forestali, l'utilizzo dei modelli matematici ha assunto particolare importanza, permettendo la rappresentazione concettuale di sistemi e di processi ecologici complessi, in modo schematico e semplificato.

Compito del modello è quello di tradurre in termini matematici formali le conoscenze relative ai processi e ai fenomeni oggetto di studio. In generale i modelli che stimano la produttività forestale possono essere suddivisi in tre categorie principali in funzione delle diverse metodologie applicate:

- *modelli meccanicistici* (su base funzionale) sono elaborati sulla base della conoscenza dei processi che rappresentano un fenomeno complesso attraverso una sequenza di algoritmi che tende a rappresentare il fenomeno stesso. Nel caso dei modelli di processo su base fisiologica, viene simulato l'insieme dei processi che portano ai fenomeni di assimilazione e quindi di produzione della sostanza organica. Le stime di produttività generate dal modello sono quindi influenzate dall'effetto delle variabili stazionali e ambientali sui processi di assimilazione della sostanza organica e quindi di accrescimento, consentendo di esplorare diverse ipotesi gestionali e generare previsioni di lungo periodo.
- *modelli empirici*, sono fondati su relazioni di regressione determinate sperimentalmente e si basano su misure del prodotto e sulla conseguente descrizione statistica del prodotto stesso. In pratica l'accuratezza della stima del modello è funzione della quantità di dati rilevati in campo, inoltre l'ambito di applicazione del modello è legato proprio alla specificità del sito in cui sono stati implementati, risultando pertanto degli strumenti poco flessibili e incapaci di simulare risposte fisiologiche indotte da variazioni ambientali o strutturali.
- *modelli ibridi*, tendono ad integrare le caratteristiche sia dei modelli empirici sia di quelli meccanicistici.

I primi modelli di accrescimento sviluppati per la gestione forestale sono stati di tipo empirico, cioè fondati su relazioni di regressione determinate sperimentalmente, e basati interamente su misure effettuate in campo, sebbene descrivano accuratamente il sistema bosco nell'intervallo di condizioni per cui sono stati costruiti e calibrati, non sono però estrapolabili al di fuori di tale intervallo e quindi sono degli strumenti poco flessibili e incapaci di simulare risposte fisiologiche indotte da variazioni ambientali o strutturali non applicabili ad altri contesti con scopo predittivo.

4. Metodologie per la stima degli assorbimenti di CO₂ da parte dei sistemi forestali.

D'altra parte i modelli meccanicistici, su base funzionale, tendono a rappresentare i processi alla base di un fenomeno complesso, permettendo quindi di conoscere gli effetti delle variabili esterne e le loro interazioni sui processi rappresentati. In tal modo i modelli di processo rappresentano uno strumento di stima estremamente flessibile, capace quindi di esplorare diversi ambiti sperimentali (Landsberg, 2003).

I modelli di processo su base funzionale hanno avuto un forte sviluppo negli ultimi 20 anni, capaci di rappresentare fedelmente le nuove conoscenze ecofisiologiche e rivelandosi validi strumenti di stima e previsione della produttività ecosistemica. Uno dei limiti operativi dei modelli a base funzionale è rappresentato dal numero elevato di parametri di *input* richiesto, spesso difficili da reperire o da misurare. Infine la crescente capacità di calcolo a disposizione dei ricercatori e la disponibilità di dati telerilevati ad elevata risoluzione, ha consentito di estendere le simulazioni a diversa scala spaziale e temporale attraverso l'implementazione delle routine di calcolo dei modelli in ambiente GIS (*Geographic Information System*), permettendo l'up-scaling delle applicazioni da modalità sito-specifica a scala continentale e globale (Franklin *et al.*, 1997).

I modelli maggiormente impiegati nella stima dei *carbon sinks* terrestri, si basano sull'approccio dell'efficienza d'uso della luce (LUE, *light-use-efficiency*) che stima l'efficienza della pianta nella conversione della radiazione fotosinteticamente attiva assorbita (aPAR, *absorbed photosynthetically active radiation*) in produttività primaria lorda (Mäkelä *et al.* 2008). Questi modelli assumono una dipendenza di tipo lineare tra la GPP e la aPAR, ridotta dall'effetto delle variabili ambientali (McMurtrie *et al.*, 1994; Landsberg & Waring, 1997, Running *et al.* 2004). La relazione generica dei modelli basati sulla LUE è la seguente:

$$GPP = fPAR \times PAR \times \epsilon_{\max} \times f$$

Dove PAR (MJ m⁻²) è la radiazione fotosinteticamente attiva incidente, fPAR è la frazione di PAR assorbita dalle chiome, ϵ_{\max} (gC m⁻² MJ⁻¹ aPAR) rappresenta la LUE potenziale in assenza di stress ambientali e f varia da 0 a 1 e rappresenta le limitazioni ambientali (climatiche ed edafiche) alla LUE potenziale.

Tra i diversi modelli basati sull'approccio della LUE, il modello 3-PGS (*Physiological Principles in Predicting Growth*) Landsberg & Waring (1997), e la successiva versione 3-PGSpatial (Coops & Waring, 2001, Tickle *et al.*, 2001) che utilizza un forcing di dati telerilevati di indice di area fogliare (LAI, *Leaf Area Index*) e fPAR, sono stati ampiamente testati su diverse tipologie forestali. L'applicazione del modello richiede un numero limitato di parametri, in genere derivati dalla letteratura o dalla calibrazione del modello su

dati sperimentali di flussi di crescita, permettendo in tal modo l'applicazione a più specie. Il modello rappresenta la risposta della conduttanza stomatica e della LUE ai principali parametri ambientali. In particolare le limitazioni climatiche ed edafiche alla produttività dei sistemi forestali sono rappresentate dai modificatori, grandezze adimensionali il cui valore è compreso tra 0 (massima restrizione) e 1 (restrizione nulla).

A partire dalla radiazione solare incidente mensilmente sulle foglie (Fig. 4.6), considerando i vari fattori ambientali di input (temperatura, pressione di vapore, deficit idrico del suolo, n° di giorni di gelo) è possibile ottenere una stima della produttività lorda del soprassuolo e della crescita delle varie parti delle piante (radici, fusto, chioma), assumendo che:

- la fotosintesi del bosco sia proporzionale alla quantità di energia luminosa assorbita dalla copertura (Monteith 1977, Landsberg & Hingston 1996);
- a causa delle limitazioni ambientali (legate a contenuto idrico del suolo, deficit di saturazione, temperatura atmosferica, giorni di gelo) e dell'età solo una parte della radiazione fotosinteticamente attiva assorbita possa essere effettivamente utilizzata nei processi fotosintetici;
- il rapporto tra la NPP e la GPP sia in buona approssimazione costante ($NPP/GPP = 0.47$; Waring *et al.* 1998);
- l'allocazione delle risorse disponibili per la crescita all'apparato radicale aumenti in relazione ai fattori di stress e all'età del bosco (Santantonio 1989, Cannell & Dewar 1994, Magnani *et al.* 2000).
- le risorse non utilizzate per la crescita radicale vengano ripartite tra fusto e foglie secondo equazioni allometriche appropriate per la specie;
- la conduttanza di copertura (somma della conduttanza stomatica delle foglie nell'intera chioma) e quindi la traspirazione del bosco raggiungano un valore massimo quando l'indice di area fogliare (LAI) raggiunge un valore di $3.0 \text{ m}^2/\text{m}^2$ (Leuning *et al.* 1995, Kelliher *et al.* 1995) e vengano modulate in funzione delle stesse limitazioni ambientali ed endogene sopra menzionate.

Infine vanno ricordati modelli di processo come HYDRALL (Magnani *et al.*, 2000) che hanno sviluppato un approccio innovativo nella rappresentazione dei fenomeni di allocazione della sostanza organica. In particolare è stato introdotto il principio di 'limitazione idraulica all'allocazione, pertanto i rapporti di allocazione non vengono più considerati fissi, ma hanno una risposta dinamica alle limitazioni idrauliche indotte dalle variabili ambientali all'interno della pianta stessa (Magnani *et al.*, 2002; Magnani *et al.*, 2004).

4. Metodologie per la stima degli assorbimenti di CO₂ da parte dei sistemi forestali.

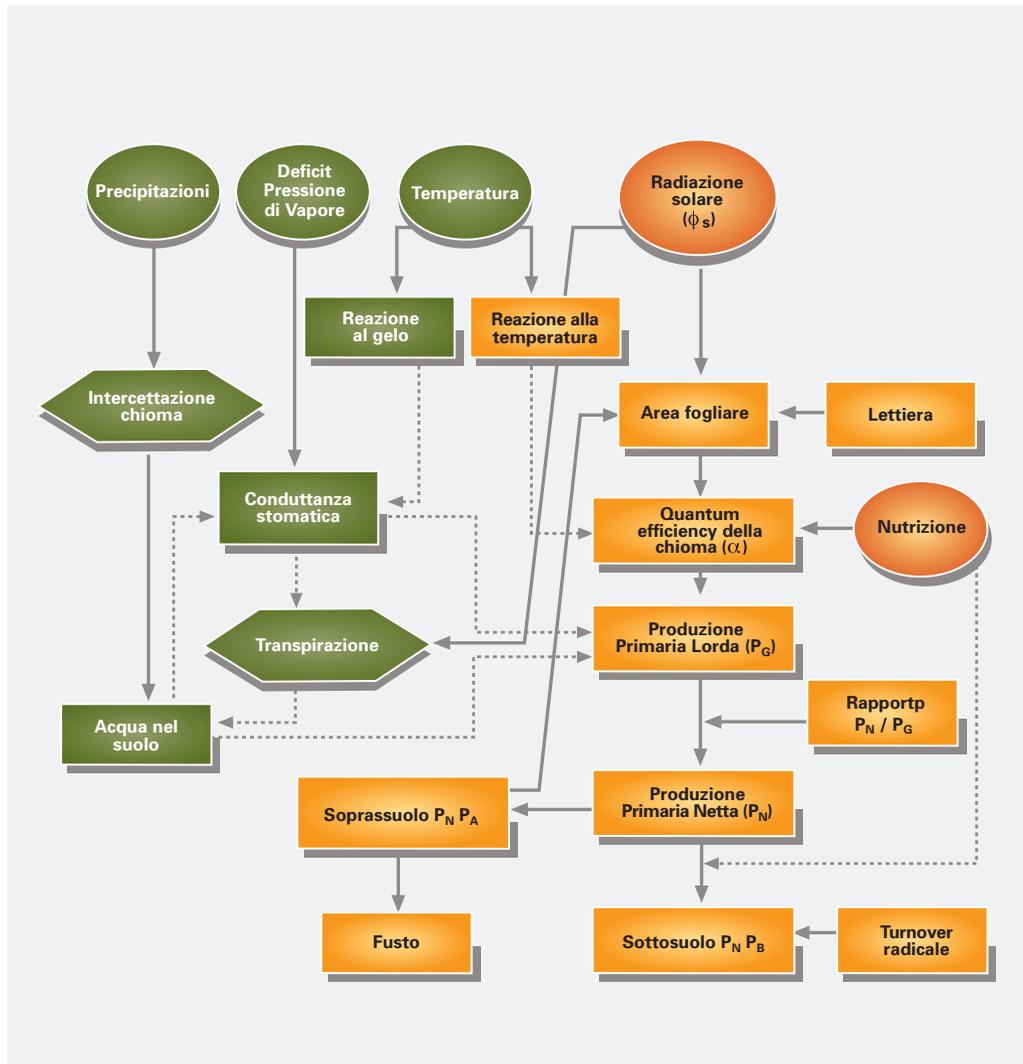


Figura 4.6 Diagramma di flusso del modello 3-PGS, la parte colorata in grigio rappresenta le componenti del modello che concorrono al bilancio idrologico del suolo. Attraverso il controllo stomatico, le componenti del bilancio idrologico modificano il bilancio del carbonio (a destra).

4.3 Il ruolo della respirazione del suolo nel bilancio del carbonio nelle foreste: recenti progressi e quesiti aperti

4.3.1 Introduzione

Il carbonio (C) è accumulato negli ecosistemi terrestri attraverso la fotosintesi e ritorna in atmosfera attraverso una serie di processi che collettivamente sono definiti respirazione. A livello globale, la fotosintesi e la respirazione si bilanciano tra loro (Schimel, 1995), ma, se si considerano i processi respirativi, il flusso di CO₂ dal suolo è il secondo flusso per importanza nella maggior parte degli ecosistemi terrestri e può rappresentare tra il 60 ed il 90% della respirazione totale (Goulden *et al.*, 1996; Longdoz *et al.*, 2000). In particolare, secondo Raich e Potter (1995), il flusso di CO₂ dal suolo rappresenta il 26% dei flussi di questo gas tra biosfera ed atmosfera e corrisponde a più di 10 volte della CO₂ rilasciata dall'utilizzo di combustibili fossili. Pertanto, ogni aumento nelle emissioni dal suolo in risposta a cambiamenti ambientali può aumentare la concentrazione di CO₂ in atmosfera determinando un feedback positivo sul cambiamento climatico (Raich e Tufekcioglu, 2000).

Secondo Kuzyakov (2006) e Subke *et al.* (2006) è possibile distinguere cinque principali componenti della respirazione del suolo (Fig 4.7): (a) respirazione radicale di mantenimento, (b) respirazione rizomicrobica (i.e. decomposizione dei carboidrati rilasciati dalle radici ad opera dei microrganismi), (c) decomposizione della sostanza organica fresca, (d) decomposizione della sostanza organica più vecchia (SOM), (e) stimolazione della SOM in seguito all'*input* di carbonio organico fresco attraverso le radici e la lettiera (Fontaine *et al.*, 2007), (f) dilavamento dei carbonati presenti nel suolo, (g) effetto di "pompaggio" della CO₂ dal suolo in seguito all'azione del vento (Delle Vedove *et al.*, 2007).

4. Metodologie per la stima degli assorbimenti di CO₂ da parte dei sistemi forestali.

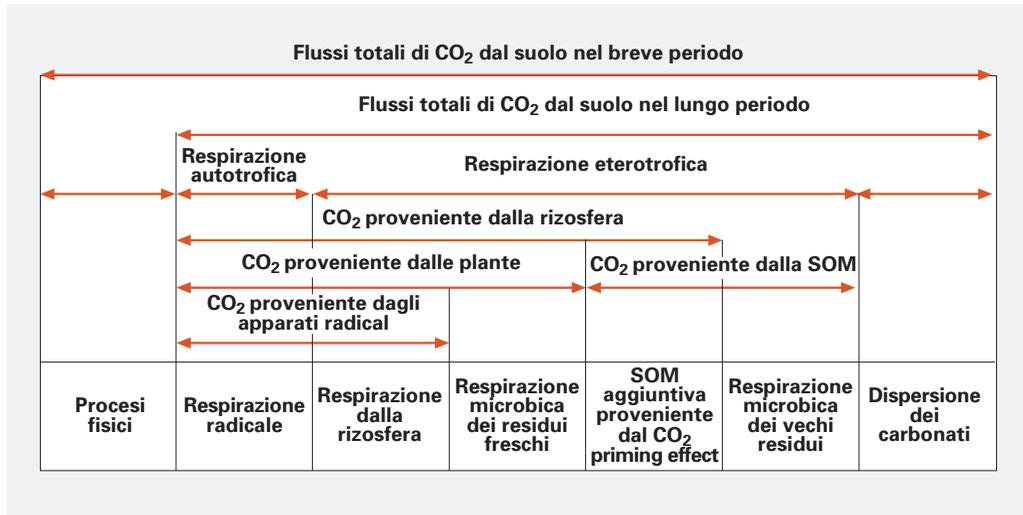


Figura 4.7 Principali componenti della respirazione del suolo (da Kuzyakov, 2006, modificato).

Il contributo relativo di ciascuna componente al flusso totale è controllato da un insieme di fattori biotici ed abiotici come la temperatura ed umidità del suolo, il tipo e la struttura della vegetazione, l'attività fotosintetica, la fase fenologica e il disturbo antropico. Tuttavia, mentre i fattori che controllano il flusso totale di CO₂ dal suolo sono ormai ben noti, manca ancora una teoria che possa spiegare come i diversi fattori interagiscano tra loro anche a causa delle difficoltà di misurazione del flusso totale e delle sue diverse componenti.

Il presente paragrafo ha i seguenti obiettivi: i) fornire una visione generale dei principali metodi di misura della respirazione del suolo e dei metodi per separare le diverse componenti (i.e. respirazione autotrofa vs. respirazione eterotrofa); ii) considerare i principali fattori che possono modificare i tassi di respirazione; iii) sottolineare possibili linee di ricerca future in questo campo.

4.3.2 Metodi di misura e di partizione del flusso

Nonostante la crescente popolarità della tecnica della correlazione turbolenta (EC) per le misure degli scambi netti di C dagli ecosistemi (Baldocchi, 2003), i metodi tradizionali

di misura della CO₂ rilasciata dal suolo attraverso l'utilizzo di camerette di respirazione sono ancora particolarmente utili per la partizione del flusso tra le diverse sorgenti e per comprendere le dinamiche di breve e lungo periodo del C nel suolo (Davidson *et al.*, 2002). Ciò è legato non solo alle limitazioni della EC (i.e. terreni pianeggianti, omogeneità della canopy, buona turbolenza) e ai suoi elevati costi di installazione e manutenzione, ma specialmente al fatto che questa tecnica consente di ottenere solo la respirazione ecosistemica non potendo distinguere tra le diverse sorgenti di questo flusso (Buchmann, 2002; Trumbore, 2006). Alcuni studi hanno utilizzato contemporaneamente sia l'EC che le camerette di respirazione al fine di derivare la respirazione del suolo dallo scambio netto ecosistemico (Dore *et al.*, 2003) o per correggere i flussi notturni misurati con l'EC (Law *et al.*, 1999).

Per quanto riguarda nello specifico il flusso di CO₂ dal suolo, esso può essere misurato attraverso diverse tecniche di misura. In particolare, Livingston e Hutchinson (1995) hanno distinto tre diverse metodologie: sistemi chiusi statici, sistemi chiusi dinamici e sistemi aperti dinamici. Nei primi due tipi, il flusso di CO₂ è stimato misurando il tasso di aumento della concentrazione all'interno di una camera che è posta sulla superficie del suolo per un certo periodo di tempo. Nei sistemi aperti dinamici, invece, il flusso è calcolato come differenza tra la concentrazione di CO₂ in ingresso ed in uscita dalla camera, noto il flusso d'aria che passa attraverso di essa. Al momento, però, non esiste un sistema di misura di riferimento, ma ciascun gruppo di ricerca usa sistemi commerciali (i.e. LiCor, PP *System*) o sistemi costruiti in proprio (Pumpanen *et al.*, 2004). Una rassegna dettagliata dei vantaggi e degli svantaggi di ciascun tipo di sistema può essere trovata in letteratura (Livingston e Hutchinson, 1995; Hutchinson e Livingston, 2002; Davidson *et al.*, 2002). In ogni caso il principale problema per la stima della respirazione del suolo è legato alla sua elevata variabilità temporale e spaziale (Xu e Qi, 2001). Infatti, come detto in precedenza, il flusso di CO₂ dal suolo può variare in funzione di numerose variabili tra cui la temperatura e l'umidità del suolo e l'*input* di C attraverso la fotosintesi. Al fine di comprendere meglio i processi che influenzano le emissioni di CO₂ dai suoli e per risolvere il problema della variabilità spaziale e temporale, sono quindi necessarie misure di respirazione in continuo basate sull'utilizzo di sistemi automatici. Tali sistemi sono generalmente di tipo chiuso dinamico e sono costituiti da più camerette (Fig. 4.8) con apertura/chiusura automatica collegate attraverso un sistema di valvole e tubi ad una pompa e quindi ad un analizzatore ad infrarossi di CO₂ e H₂O. Durante il ciclo di misura, la cameretta è chiusa e l'aria è fatta circolare tra essa e l'analizzatore con un flusso costante. L'umidità, la pressione e la temperatura, così come la concentrazione di CO₂, sono misurate in continuo ogni secondo (Fig. 4.9).

4. Metodologie per la stima degli assorbimenti di CO₂ da parte dei sistemi forestali.



Figura 4.8 Cameretta per la misura dei flussi di CO₂ rilasciati dal suolo

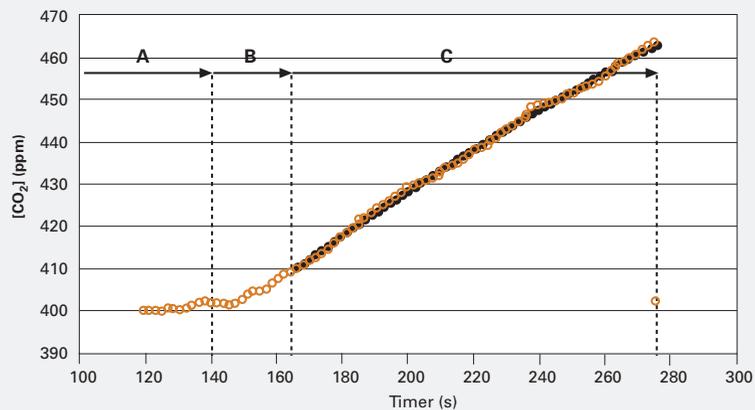


Figura 4.9 Principio della misura con un sistema chiuso dinamico: chiusura della camera e misura della concentrazione iniziale di CO₂ (A); mixing (B); regressione non lineare (C). I simboli aperti rappresentano la concentrazione di CO₂ misurata, i simboli chiusi rappresentano i valori calcolati attraverso l'applicazione del modello non lineare.

Generalmente, al fine di minimizzare la sottostima del flusso dovuta all'alterazione del gradiente diffusivo, sui dati misurati è fittato un modello non-lineare al fine di stimare il tasso di crescita della CO₂ all'interno della camera (Davidson *et al.*, 2002; Delle Vedove *et al.*, 2007):

$$C(t) = C_x - (C_x - C_0) \times \exp^{-a(t-t_0)}$$

in cui C(t) è la concentrazione di CO₂ al momento t corretta per la frazione molare dell'acqua, C₀ è la concentrazione iniziale alla chiusura della camera, C_x è l'asintoto della curva e a è il coefficiente che definisce la curvatura. I coefficienti C_x, C₀ possono essere calcolati utilizzando un metodo iterativo Gauss Newton (Delle Vedove *et al.*, 2007). Il tasso di iniziale di crescita della CO₂ (dC/dt) per C₀ e t₀ è calcolato secondo l'equazione:

$$\frac{dC}{dt} = a \times (C_x - C_0) \times \exp^{-a(t-t_0)}$$

Quindi il flusso di CO₂ dal suolo (μmol CO₂ m² s⁻¹) è calcolato attraverso l'equazione:

$$SR = \frac{V}{S} \cdot \frac{dC}{dt} \cdot \frac{P_0}{R \cdot (T_0 + 27315)}$$

in cui P₀ e T₀ sono rispettivamente la pressione (kPa) e la temperatura (°C) dell'aria alla chiusura della camera, R è la costante universale dei gas (8.31 x 10⁻³ m³ kPa mol⁻¹ K⁻¹), V è il volume del sistema (m³) e S è l'area della cameretta (m²).

Un sistema alternativo di misurazione in continuo della respirazione del suolo è rappresentato dal metodo diffusivo proposto da Tang *et al.* (2003). Il metodo consiste nel misurare la concentrazione di CO₂ a diverse profondità del suolo attraverso dei sensori (i.e. *Vaisala Carbocap*) collegati a un *datalogger*. Il flusso di CO₂ è calcolato applicando la prima legge di Fick:

$$F = -D_s \frac{dC}{dz}$$

in cui F è il flusso (μmol m² s⁻¹), D_s è la diffusività del suolo (m² s⁻¹), C è la concentrazione (μmol m⁻³) e dC/dz è il gradiente verticale di CO₂ nel suolo.

4. Metodologie per la stima degli assorbimenti di CO₂ da parte dei sistemi forestali.

In alternativa possono essere utilizzati sistemi portatili di misura con cui effettuare misure periodiche del flusso. Quindi, nota la temperatura e l'umidità del suolo misurate in continuo, è possibile gapfillare i dati mancanti utilizzando diversi modelli come quelli proposti da Reichstein *et al.* (2003).

Per quanto riguarda la separazione delle diverse sorgenti, anche in questo caso vi sono diverse tecniche che possono essere distinte in tre principali categorie (Hanson *et al.*, 2000; Kuzyakov, 2006):

- 1) metodi con l'esclusione di una componente: questi metodi si basano sull'eliminazione del contributo delle respirazione radicale al flusso. In questo gruppo sono inclusi il "root exclusion" e il "tranching". Nel primo caso, cilindri aperti da entrambe le estremità sono inseriti nel suolo al fine di non consentire la crescita radicale sotto la cameretta di respirazione (Fig. 4.10); nel secondo caso tutte le radici che intersecano un perimetro stabilito intorno alla camera sono tagliate al fine di eliminare l'apporto di fotosintetati;



Figura 4.10 *Root exclusion* per separare la respirazione eterotrofica da quella totale. In questo caso, un cilindro metallico aperto da entrambe le estremità è inserito nel terreno per impedire la crescita delle radici al di sotto della cameretta.

- 2) metodi con la manipolazione di una componente: in questo caso si procede alla separazione fisica del flusso derivante dalla sostanza organica da quello derivante dalle radici. Un metodo è quello del "girdling" attraverso cui si interrompe il flusso floematico senza interrompere quello xilematico. In tal modo non si modifica l'*uptake* idrico da parte delle radici ma si interrompe la loro respirazione;

- 3) metodi basati su traccianti: questi metodi si basano sulla modificazione del rapporto tra isotopi del carbonio nelle piante o sull'utilizzo di variazioni naturali del ^{13}C (piante C3 e piante C4) al fine di suddividere la CO_2 liberata da sorgenti diverse.

Tutti i metodi riportati sommariamente qui sopra non sono privi di svantaggi ed è impossibile sceglierne uno ottimale. Infatti, alcuni di questi metodi determinano un ridotto disturbo all'ecosistema, ma sono poco applicabili universalmente (i.e. *labelling* con isotopi) o, al contrario, possono causare un elevato disturbo all'ecosistema, ma avere nel contempo un'elevata applicabilità (i.e. *root exclusion*). Tuttavia, Subke *et al.* (2006) hanno verificato una buona concordanza tra i risultati derivanti dall'applicazione delle diverse tecniche.

4.3.3 Meccanismi di controllo

Come detto in precedenza, la respirazione del suolo è influenzata da diversi fattori biotici ed abiotici. Uno dei principali fattori è rappresentato dalla temperatura del suolo. Studi biochimici e fisiologici hanno dimostrato che la respirazione aumenta esponenzialmente con la temperatura (Fig. 4.11).

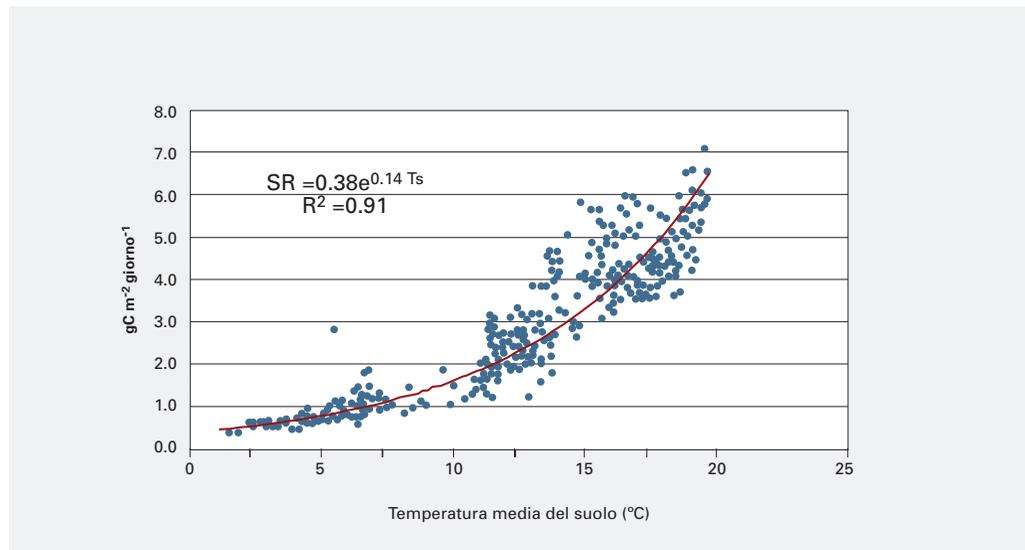


Figura 4.11 Esempio di relazione tra respirazione totale del suolo giornaliera (SR) e temperatura del suolo media giornaliera (Ts) in una fustaia di querce a Jastrebarsko (Croazia).

4. Metodologie per la stima degli assorbimenti di CO₂ da parte dei sistemi forestali.

Tuttavia la sensibilità delle diverse componenti costituenti il flusso alla temperatura è diversa (Epron *et al.*, 2001). Infatti, la respirazione radicale aumenta con la temperatura, ma le radici giovani sono più sensibili rispetto alle vecchie e la risposta è fortemente legata all'accrescimento radicale. Alcuni recenti studi hanno suggerito che non ci sia differenza nella sensibilità tra respirazione autotrofa ed eterotrofa (i.e. Irvine *et al.*, 2005).

Per quanto riguarda lo stoccaggio del C nel suolo nel lungo periodo, vi è un forte dibattito a livello scientifico riguardo al diverso comportamento della SOM di più vecchia origine rispetto a quella più giovane. Woodwell *et al.* (1998) hanno ipotizzato che un futuro aumento della temperatura accelererà la decomposizione della SOM e contribuirà in questo modo ad aumentare la CO₂ atmosferica. Secondo Giardina e Ryan (2000) il tasso di decomposizione del C nei suoli forestali non è controllato dalla temperatura e quindi il solo aumento di questa non stimolerà la decomposizione. Dall'altro lato, Knorr *et al.* (2005) hanno dimostrato che la sostanza organica più recalcitrante è più sensibile alla temperatura rispetto alla sostanza organica labile implicando un *feedback* sulla decomposizione in seguito al riscaldamento globale.

L'influenza dell'umidità del suolo a scala giornaliera o stagionale è generalmente meno importante della temperatura (Hanson *et al.*, 1993). Tuttavia, la sua importanza aumenta in condizioni siccitose come quelle della regione mediterranea: suoli secchi mostrano generalmente flussi di CO₂ più bassi (Reichstein *et al.*, 2002; Davidson *et al.*, 2002) (Fig. 4.12).

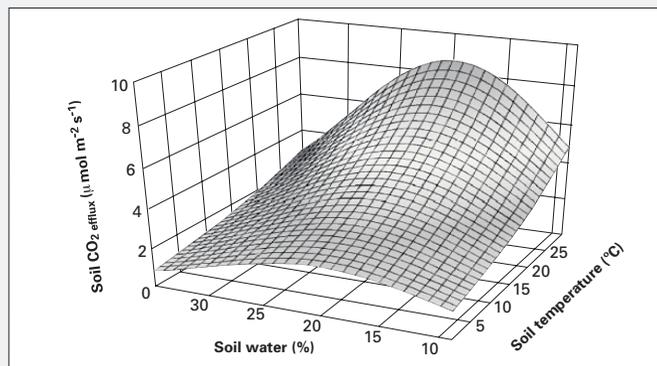


Figura 4.12 Relazione tra respirazione del suolo, temperatura ed umidità del suolo (da Tang *et al.*, 2005).

Inglisma *et al.* (2009) hanno misurato un elevato flusso positivo di C utilizzando l'EC dopo eventi piovosi in ecosistemi mediterranei ed hanno verificato che la risposta al *rewetting* in termini di respirazione del suolo nei diversi ecosistemi (macchia, bosco, ex-agricolo) è legata alle condizioni iniziali di umidità del suolo. Inoltre, gli stessi autori hanno dimostrato che il contributo del flusso organico al flusso totale decresce dal 30% al 10% dopo il *rewetting* a causa della dissoluzione dei carbonati presenti nel suolo. Alberti *et al.* (2007) hanno verificato in un esperimento di manipolazione della pioggia che l'aumento nella disponibilità idrica aumenta la produzione primaria lorda (GPP), ma anche la respirazione eco sistemica (Reco) causando quindi una riduzione nello scambio netto ecosistemico annuale (NEE).

Allo stesso modo, è anche importante il tipo di vegetazione presente e la sua produttività. Raich e Tufekciglu (2000) hanno misurato flussi più elevati nei prati che nelle foreste in condizioni climatiche simili e la respirazione eterotrofica è più elevata in siti con maggiore produzione di lettiera (Fig. 4.13).

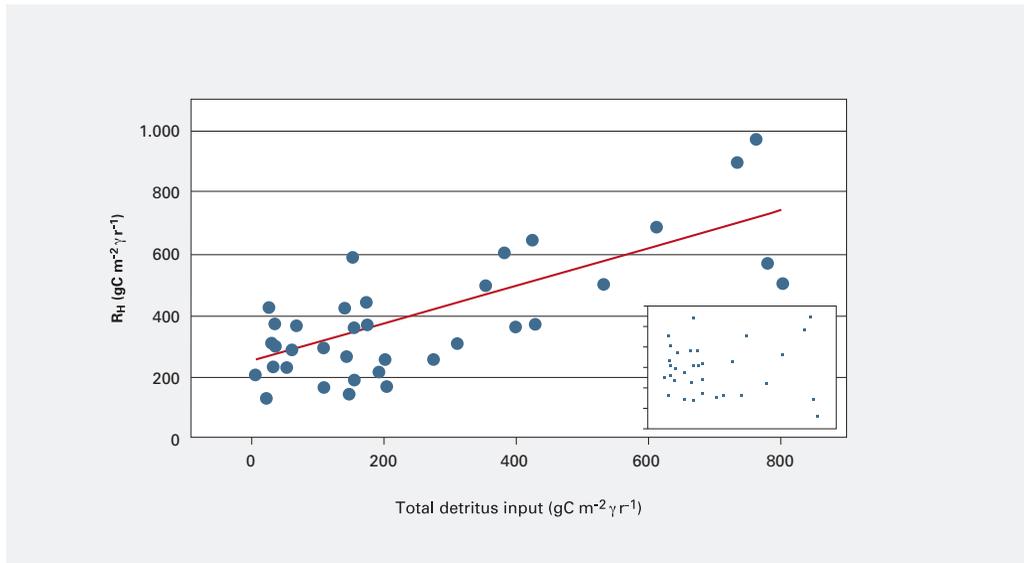


Figura 4.13 Relazione tra respirazione eterotrofica (RH) e quantità di lettiera prodotta (da Bond-Lamberty *et al.*, 2004).

In questo senso, Raich e Schlesinger (1992) hanno determinato una correlazione lineare tra respirazione del suolo e produzione primaria netta (NPP) e Sampson *et al.* (2007) hanno verificato una relazione tra respirazione ed attività fotosintetica ed hanno determinato che variazioni nella struttura del soprassuolo o nella composizione specifica possono indurre cambiamenti nella respirazione a causa di variazioni nella fornitura di C labile attraverso le radici. Allo stesso modo, Jassens *et al.* (2001) ha individuato una relazione lineare tra respirazione del suolo annuale e GPP in 18 ecosistemi forestali.

Infine, un altro fattore particolarmente importante è rappresentato dalla gestione forestale. Tedeschi *et al.* (2005) hanno misurato un momentaneo aumento della respirazione subito dopo la ceduzione ed una successiva decrescita nel periodo successivo. Tang *et al.* (2005) hanno concluso che i diradamenti non modificano in modo significativo le relazioni tra respirazione del suolo – temperatura e umidità del suolo.

4.3.4 Sviluppi futuri

Al fine di poter elaborare una “teoria” sulla respirazione del suolo è necessario essere in grado di separare in maniera efficace la respirazione autotrofica da quella eterotrofica e di determinare i fattori che controllano le loro variazioni stagionali, inter-annuali e decennali. I futuri sviluppi nelle tecniche di partizione del flusso tra le diverse sorgenti dovranno essere verosimilmente basati sulla combinazione delle tecniche esistenti e sulla loro standardizzazione. Inoltre, sembra che vi sia ancora la mancanza di una teoria definitiva che leghi le risposte della respirazione alle variabili ambientali. In questo senso, sembra necessario avvalersi di due approcci di studio:

- 1) approcci basati sui meccanismi con cui studiare la sensitività alle variabili ambientali dei diversi comparti del C nel suolo e delle componenti della respirazione;
- 2) approcci ecosistemici basati su esperimenti di manipolazione multifattoriali (i.e. esperimenti di *transplanting* (i.e. Arnone *et al.*, 2008) o esperimenti di manipolazione della pioggia e della temperatura in situ).

Un altro elemento importante è poi la comprensione del ruolo della gestione antropica sulla respirazione del suolo e quindi sul carbonio presente nel suolo. Infatti, la respirazione del suolo è una tematica globale sia dal punto di vista scientifico che applicativo specialmente per l’implementazione di opzioni di mitigazione (i.e. minime operazioni colturali in agricoltura; intensità dei diradamenti nelle foreste gestite, ecc.). Un punto centrale riguarda il considerare la respirazione del suolo nei bilanci per la stima della produzione netta ecosistemica (NEP). Campbell *et al.* (2009), esaminando una cronosequenza in cui

erano stati effettuati dei diradamenti, hanno verificato che l'utilizzo di misure dirette di respirazione eterotrofica o la sua derivazione da misure biometriche possono portare a risultati decisamente contrastanti nella stima della NEP. Pertanto, sono necessarie ulteriori ricerche non soltanto per chiarire i meccanismi ma anche per sviluppare metodi di contabilizzazione appropriati ed elaborare strategie di mitigazione efficaci.

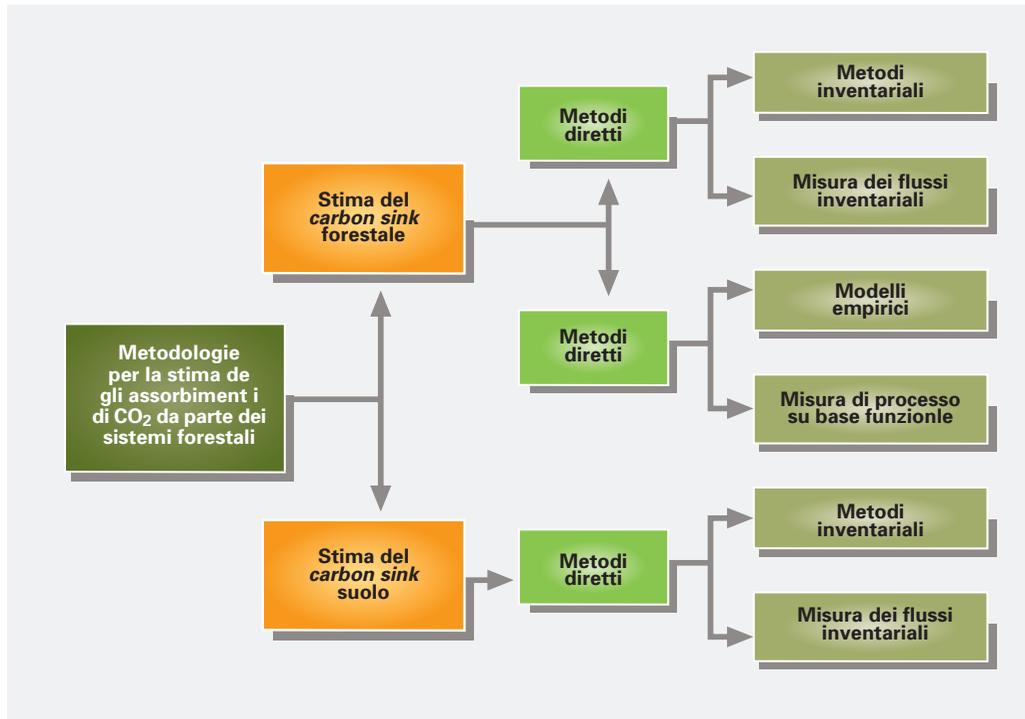


Figura 4.14 Schema sinottico delle metodologie per la stima degli assorbimenti di CO₂.



5

Le norme internazionali relative al ruolo del settore forestale nella riduzione delle emissioni di gas serra

Davide Pettenella, Lorenzo Guerci

“Climate change cannot be won without the world’s forests. This, however, will be a complex and challenging feat. Nonetheless, it is one of the best large-scale investments we can make against climate change that could result in an equally large-scale dividend.”

Ban Ki-moon, UN Secretary-General, September 2008, New York City

5.1 Il ruolo delle foreste nelle politiche di mitigazione del cambiamento climatico

Secondo l’Inventario forestale mondiale del 2005 realizzato dalla FAO (FAO, 2006), la superficie occupata dalle foreste è di quasi 4 miliardi di ettari; questi terreni offrono un contributo globale in termini di stock di carbonio di circa 633 Gt di C e assorbono annualmente nella biomassa legnosa, nel suolo e nella lettiera circa 1,6 Gt (CPF, 2008).

Se le foreste, finché conservate e gestite in modo sostenibile, sono una riserva di carbonio, una volta distrutte si trasformano in una considerevole sorgente di gas-serra. Gli attuali processi di deforestazione e di degradazione delle foreste producono emissioni di gas-serra pari a 1,6 GtC/a (IPCC, 2007; Denman *et al.* 2007), una quantità che equivale al 20% delle emissioni globali di origine antropica. Tra il 2000 e il 2005 sono stati distrutti circa 12,9 milioni di ettari all'anno di foreste, in grandissima prevalenza concentrati nei paesi in via di sviluppo, mentre nei paesi occidentali le aree coperte da foreste sono aumentate (con un effetto positivo sul bilancio fissazione-emissione di carbonio), senza tuttavia compensare le perdite di superficie a bosco che è a livello mondiale si è complessivamente ridotta ad un ritmo di 7,3 milioni di ettari all'anno.

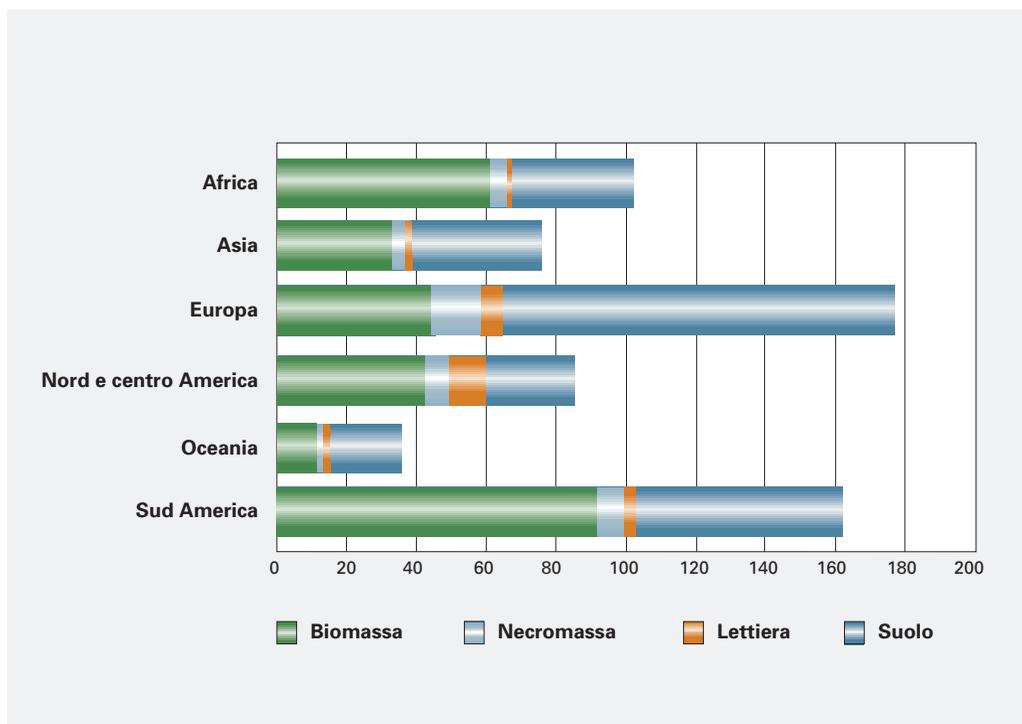


Figura 5.1 Stock complessivo de C nelle foreste secondo l'inventario forestale della FAO nel 2005.

Fonte: Global Forest Resources Assessment 2005.

5. Le norme internazionali relative al ruolo del settore forestale nella riduzione delle emissioni di gas serra

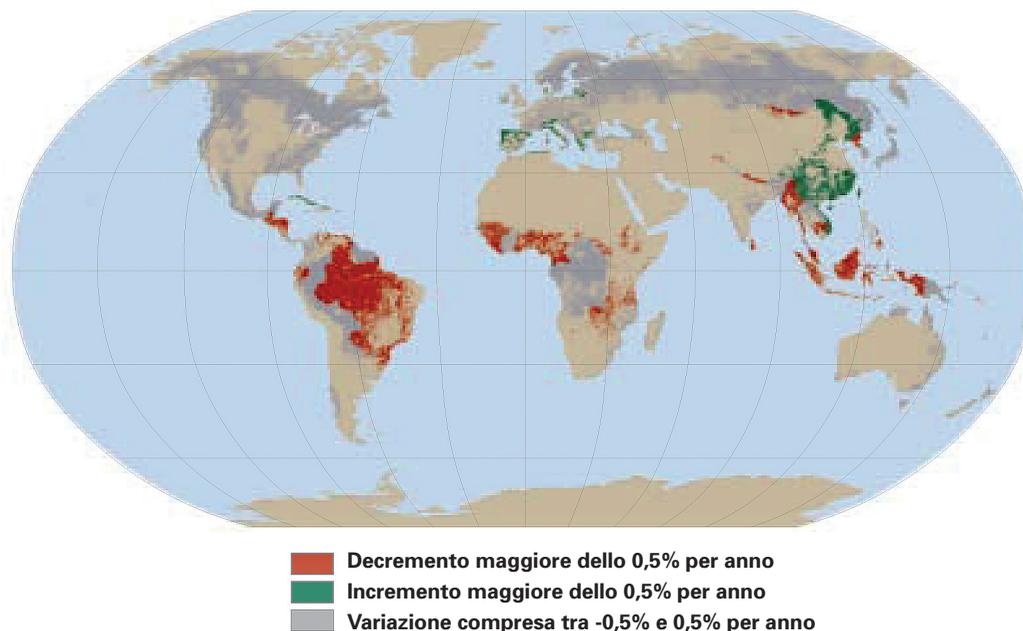


Figura 5.2 Paesi con la più alta variazione nella superficie forestale tra il 2000-2005.

Fonte: Global Forest Resources Assessment 2005.

Gli ecosistemi forestali hanno, quindi, un ruolo ambivalente nel ciclo del carbonio: positivo in termini di CO₂ sequestrata nel passato e di potenziale futuro assorbimento, negativo in riferimento alla reale dinamica della attuale gestione dei terreni forestali dove i processi che portano alla liberazione in atmosfera di CO₂ prevalgono nettamente sulla funzione di *sink* di carbonio.

Queste dinamiche sono state prese in considerazione negli accordi internazionali di riduzione delle emissioni di CO₂. A partire dalla Convenzione-Quadro per i Cambiamenti Climatici delle Nazioni Unite (*United Nations Framework Convention for Climate Change* – UNFCCC) approvata a Rio de Janeiro nel 1992 durante la prima Conferenza su clima e sviluppo economico. A seguito della Convenzione è stato approvato il Protocollo di Kyoto, entrato in vigore nel 2005, che si pone l'obiettivo di ridurre le emissioni, oltre che attraverso il miglioramento dell'efficienza energetica e la riduzione delle emissioni, anche con una serie di misure nel settore forestale. Tali

attività si concretizzano principalmente nella realizzazione di nuove piantagioni su terreni non coperti da vegetazione forestale e nel miglioramento degli stock di carbonio delle foreste esistenti.

Nei recenti sviluppi degli accordi internazionali sul cambiamento climatico si sta delineando una nuova strategia d'azione per le foreste che vede in prima linea accanto alla realizzazione di piantagioni, anche la lotta alla deforestazione. La comunità internazionale reputa la promozione di forme di gestione forestale sostenibile (SFM) la prima strategia per arginare questo problema.

Parallelamente a questi interventi, legati ad iniziative di carattere istituzionale, la società civile si è attivata, su base volontaria, con una serie di azioni finalizzate alla riduzione delle emissioni anche grazie all'utilizzo di attività forestali.

Nelle pagine che seguono verranno brevemente illustrati i contenuti delle iniziative istituzionali e di quelle su base volontaria che prendono in considerazione il ruolo delle foreste nelle strategie di lotta ai cambiamenti climatici.

5.2 Le foreste nel Protocollo di Kyoto

Il Protocollo di Kyoto (PK) è lo strumento esecutivo attraverso cui i paesi firmatari si sono posti degli impegni vincolanti per la riduzione delle proprie emissioni di gas-serra in atmosfera. Il PK, applicando il principio di una responsabilità condivisa tra tutti i paesi, ma con impegni differenziati, ha previsto che le nazioni con più alto tasso di sviluppo economico (e, quindi, con maggiori responsabilità accumulate nel passato in termini di emissioni di gas di serra) raggiungano entro il 2008-12 specifici obiettivi di riduzione delle proprie emissioni definiti su base volontaria. La riduzione delle emissioni di gas-serra concordata a Kyoto è pari al 5,2% rispetto a quelle del 1990 (6,5% quello per l'Italia).

5. Le norme internazionali relative al ruolo del settore forestale nella riduzione delle emissioni di gas serra



Figura 5.3 Quadro di sintesi del protocollo di Kyoto.

Per raggiungere questi obiettivi il PK prevede di tenere in considerazione il contributo delle foreste come serbatoi di C nel rispetto di alcune regole. Esso prevede, infatti, una serie di misure in campo agricolo e forestale denominate attività di “uso del suolo, cambio uso del suolo e forestali (*Land use, Land-use Change and Forestry - LULUCF*) che devono essere computate nei bilanci nazionali dei gas-serra per diverse forme di uso del suolo².

Nello stesso tempo gli accordi presi a Kyoto prevedono che le piantagioni su terreni non forestali e i processi di deforestazione verificatisi dopo il 1990, debbano essere obbligatoriamente conteggiati dai paesi firmatari. Questo significa che deve essere quantificata ogni mutazione delle riserve di carbonio presenti negli alberi vivi e in quelli morti (fusto, rami e radici), oltre che nella lettiera e nel suolo. Vanno conteggiate, relativamente al settore forestale, unicamente le superfici che dopo il 1990 hanno subito dei cambiamenti d’uso del suolo connessi a deliberate scelte gestionali (“*direct human induced*”). Si escludono quindi dal conteggio quelle attività che, nel gergo, non sono caratterizzate da “addizionalità” rispetto ad una ordinaria condizione operativa, ovvero rispetto allo scenario “*business as usual*”.

² Le *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* definiscono sei categorie che costituiscono il settore LULUCF: foreste, coltivazioni agricole, prati e pascoli, zone umide, insediamenti antropici, altre destinazioni.

In sostanza per raggiungere i propri impegni di riduzione i paesi firmatari devono obbligatoriamente conteggiare il contributo del settore forestale (C) secondo la relazione:


$$C = (A + R) - D$$

Figura 5.4 Equazione che esplicita le voci del bilancio del carbonio per il settore forestale.

dove si intende:

(A) Afforestazione: intervento di conversione in foresta tramite rimboschimento ad opera dell'uomo (piantagione, semina o incentivazione dell'imboschimento naturale) su di un terreno dove storicamente non sono mai esistite foreste avvenuto dopo il 1° gennaio 1990 su una superficie che al 31 dicembre 1989 non era ancora forestale.

(R) Riforestazione: intervento di conversione in foresta tramite rimboschimento ad opera dell'uomo (piantagione, semina o incentivazione dell'imboschimento naturale) su di un terreno dove precedentemente esisteva un soprassuolo forestale, avvenuto dopo il 1° gennaio 1990 su una superficie che al 31 dicembre 1989 non era ancora forestale.

(D) Deforestazione: disboscamento provocato dall'azione antropica e attuato dopo il 1° gennaio 1990 su una superficie che precedentemente era forestale.

In caso di bilancio positivo tra le attività di A, R e D, i crediti di carbonio che ne derivano (noti come RMU – *ReMoval Units*) potranno essere utilizzati dal paese firmatario per il conseguimento del proprio obiettivo di riduzione delle emissioni. Allo stato attuale non ci sono limiti per il rilascio ed utilizzo di tali crediti e, in teoria, un paese potrebbe raggiungere il proprio obiettivo di riduzione utilizzando solo RMU.

Accanto al conteggio obbligatorio precedentemente descritto il PK prevede un conteggio facoltativo nei bilanci di carbonio di altre attività (cosiddette “addizionali”) che riguardano:

La gestione forestale (*forest management*) definita come un insieme di pratiche per la conduzione e l'uso sostenibile di una foresta, finalizzate al conseguimento di rilevanti funzioni ecologiche (inclusa la tutela della diversità biologica), economiche e sociali;

La gestione delle culture agrarie (*cropland management*) che comprende l'insieme di pratiche su terreni su cui sono in atto coltivazioni agrarie e su terreni messi a riposo o temporaneamente non destinati a produzioni agricole;

5. Le norme internazionali relative al ruolo del settore forestale nella riduzione delle emissioni di gas serra

La gestione dei prati e dei pascoli (*grazing management*) ovvero l'insieme di pratiche su terreni utilizzati per l'allevamento del bestiame, volte a modificare la quantità e il tipo di vegetazione e il bestiame allevato;

La rivegetazione (*revegetation*) definita come una azione antropica diretta, finalizzata ad aumentare lo stock di carbonio in un sito, mediante la realizzazione di una copertura vegetale su un'area minima di 0,5 ettari che non rientri nelle definizioni di afforestazione e riforestazione.

Come le ARD anche queste iniziative per essere contabilizzate devono essere avvenute dal 1990 in poi e devono essere dipendenti dall'azione diretta dell'uomo. Il ruolo delle attività addizionali è *in primis* quello di colmare eventuali debiti nel bilancio tra afforestazione e riforestazione da un lato e deforestazione dall'altro. Inoltre, limitatamente alla sola gestione forestale, i crediti che ne derivano, a differenza delle altre attività "*direct human induced*" non possono essere conteggiati in toto: infatti solo qualora il bilancio "(A+R)-D" sia stato pareggiato, il contributo della gestione forestale va a concorrere direttamente al raggiungimento dell'obiettivo, ma con una riduzione al 15% del contributo generale dell'utilizzo della gestione forestale. Questa percentuale di sconto si applica per tener conto del (presunto) aumento degli stock come conseguenza di fattori diversi dalle pratiche agroforestali, cioè di pratiche che non rispondano al presupposto dei essere direttamente indotte dall'azione umana ("*direct human induced*").

Il settore forestale assume quindi un compito attivo nell'arginare il cambiamento climatico secondo gli obblighi previsti dal PK. I *sink* di carbonio tuttavia rappresentano solo un complemento alle attività di riduzione delle emissioni alla sorgente ed un'opzione per guadagnare tempo in vista di un'efficace riduzione delle emissioni mediante uno sviluppo tecnologico volto al risparmio energetico e alla sostituzione delle energie fossili. Inoltre è necessaria un forte trasparenza e garanzia nella creditizzazione dei *sink* di carbonio in ambito forestale.

La funzione di *sink* legata a pratiche forestali è infatti caratterizzata da alcuni problemi, oltre a quelli della complessità del monitoraggio: la funzione di fissazione di carbonio non è costante nel tempo, è reversibile (incendi, schianti, attacchi parassitari, ...) e limitata nel tempo (la foresta accresce la propria capacità di fissazione fino ad un punto di "saturazione"). Oggi, dare troppo peso alle soluzioni di *sink* può comportare una responsabilità non da poco per le generazioni future che si troveranno a dover far fronte ad una capacità di stoccaggio potenzialmente prossima all'esaurimento o fortemente limitata. Questo fa sì che, nella strategia di riduzione delle emissioni di gas-serra, le misure LULUCF siano, almeno nei paesi occidentali, impiegabili in una logica di breve-medio periodo, anche perché i costi marginali per unità di carbonio fissabile nella biosfera tendono ad aumentare con il ridursi delle aree di intervento disponibili per nuove piantagioni e l'incremento degli *stock* medi unitari (Sauerbeck, 2001; Prentice, 2000).

Il PK definisce anche alcuni strumenti di mercato, noti come meccanismi flessibili, a cui i paesi dell'Allegato I possono ricorrere per raggiungere i loro obiettivi nazionali di riduzione delle emissioni clima-alteranti; essi sono:

Il Meccanismo di sviluppo pulito (*Clean Development Mechanism - CDM*) che consente ai Paesi industrializzati e con economia in transizione di realizzare progetti nei Paesi in via di sviluppo che producono benefici ambientali in termini di riduzione delle emissioni di gas-serra e di sviluppo economico e sociale dei Paesi ospiti. Contemporaneamente queste iniziative permettono ai Paesi promotori l'acquisizione di crediti di emissione; i crediti di C derivanti da progetti CDM prendono il nome di "*Emissions Reductions*" (CERs). Nel 2007 nell'ambito del CDM sono state scambiate 551 Mt CO₂ per un valore complessivo di circa 6,9 miliardi di dollari (Capoor e Ambrosi, 2007; Hamilton *et al.*, 2008).

L'Implementazione congiunta (*Joint Implementation - JI*) che permette ai Paesi industrializzati e con economia di transizione di realizzare progetti di contenimento delle emissioni di gas-serra in un altro Paese dello stesso gruppo e di utilizzare i crediti derivanti, congiuntamente con il Paese ospite; i crediti così generati prendono il nome di "*Emission Reduction Unit*" (ERUs) e nel 2007 sono state scambiate 41,1 Mt CO₂ di ERU per un valore complessivo di circa 495 milioni di dollari (Capoor e Ambrosi, 2007; Hamilton *et al.*, 2008).

Il Commercio delle emissioni (*Emissions Trading - ET*) che riconosce la condizione di esercitare un commercio di crediti di emissione tra i Paesi dell'Allegato I, per esempio tra un paese che abbia conseguito una diminuzione delle proprie emissioni di gas-serra superiore al proprio obiettivo e uno che viceversa non sia stato in grado di rispettare i propri impegni di riduzione delle emissioni. Questo meccanismo flessibile è stato implementato nell'Unione Europea (UE) con la creazione dell'*Emission Trading Scheme* (ETS), un mercato nel quale tutte le imprese dell'UE che operano in alcuni settori economici "*energy intensive*" devono rispettare degli obblighi di emissione annualmente definiti; per rispettare questi obblighi le imprese possono acquistare crediti di emissione disponibili sul mercato. L'ETS è attualmente il più grande mercato mondiale di scambio di quote di carbonio (Capoor e Ambrosi, 2007), anche se, per l'impostazione ad esso data dalla Commissione Europea, questo mercato esclude i crediti di emissione provenienti da attività del settore agricolo e forestale realizzate in Europa. I crediti scambiati all'interno dell'EU-ETS prendono il nome di *European Union Allowances* (EUAs); nel 2007 i crediti scambiati sono stati pari a circa 2.061 MtCO₂, per un valore complessivo di circa 50 miliardi di dollari (Capoor e Ambrosi, 2007; Hamilton *et al.*, 2008).

I meccanismi flessibili permettono, tra le altre cose, anche la realizzazione di progetti forestali in grado di generare, da un lato crediti di riduzione delle proprie emissioni per il Paese investitore e dall'altro servizi ambientali economici e sociali per il Paese

beneficiario. Fino ad ora l'unico progetto CDM in ambito forestale è stato realizzato in Cina nella regione del Guanxi con un beneficio previsto in termini di crediti di C di circa 400.000 CERs rilasciati entro il 2017.

L'attivazione in Italia del PK, come l'attività di rendicontazione dei risultati ottenuti, sono di competenza delle autorità centrali dello Stato. In altri termini non si è ritenuto finora opportuno trasferire alle Regioni e alle Province Autonome gli obblighi formali di implementazione del PK assunti dal Governo italiano in sede internazionale (Ciccarese *et al.*, 2006).

5.3 **C-Sink & C-Source:** il problema della deforestazione

I meccanismi flessibili del *Clean Development Mechanism* e della *Joint Implementation* sono oggi l'unica strategia comune che permette ai paesi industrializzati che si sono impegnati con il PK a ridurre le emissioni e a quelli in via di sviluppo o con economie in transizione di adottare strategie congiunte di mitigazione del cambiamento climatico.

Tuttavia esiste un'altra strada per implementare collaborazioni tra paesi al fine di ridurre le emissioni in atmosfera, quella della lotta alla deforestazione. In effetti, le attività di riduzione delle emissioni in rapporto al fenomeno della deforestazione e della degradazione delle foreste (definite *Reducing Emission from Deforestation and Degradation of Forest*, REDD) nei paesi in via di sviluppo sono state finora escluse dalle opzioni previste dal PK. Ciò è da ricondursi in parte alle diverse critiche mosse ai *C-sink* (permanenza, addizionalità, monitoraggio ecc.) e anche ai costi di implementazione di politiche efficaci per arginare questo problema³.

Una prima presa di coscienza in campo internazionale su questo problema si è avuta durante l'undicesima Conferenza delle Parti dell'UNFCCC nel 2005 dove i rappresentanti dei governi di Papua Nuova Guinea e Costa Rica, con il supporto di altri 8 Paesi partecipanti, attraverso una comunicazione ufficiale hanno sottolineato la necessità di elaborare strategie comuni per limitare il fenomeno della deforestazione.

Una nuova apertura su questo fronte si è avuta con il Piano d'azione approvato nella Conferenza di Bali del 2007 in cui è sottolineato la necessità di implementare "*Policy approaches and positive incentives on issues relating to reducing emissions from deforestation and forest degradation in developing countries*". Ciò è stato ulteriormente

³ Secondo stime UNFCCC il costo della riduzione a zero della deforestazione si attesterebbe intorno ai 12,2 miliardi di dollari/anno cui si dovrebbero aggiungere altri 8,2 miliardi di dollari/anno per l'implementazione di sistemi di gestione forestale sostenibile (UNFCCC, 2002; TFD, 2008).

supportato da una decisione, sempre presa a Bali, di promuovere ricerche, indagini, studi e progetti pilota con il compito di elaborare un documento d'analisi sulle REDD al fine di includere tali strategie nei negoziati futuri che si terranno a Copenhagen nel 2009 dove si svolgerà una conferenza che, come si auspica, porterà all'approvazione di un nuovo ("Kyoto2").

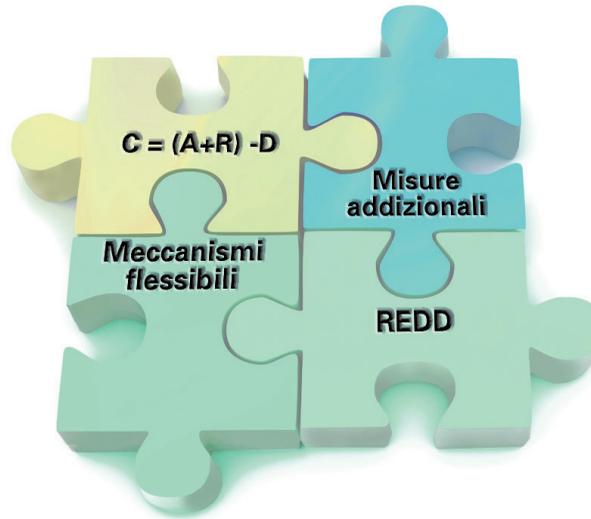


Figura 5.5 Le foreste negli accordi internazionali di mitigazione del cambiamento climatico.

Anche l'Unione Europea, consapevole degli effetti che la deforestazione ha nei confronti dell'effetto serra, vuole assumere un ruolo guida ed il problema è al centro dei prossimi incontri sul cambiamento climatico e va inquadrato nell'ambito dei negoziati internazionali. Nella recente Comunicazione COM(2008) 645/3 "*Addressing the challenge of deforestation and forest degradation to tackle climate change and biodiversity loss*", la CE si propone l'obiettivo di arrestare la perdita di superficie forestale prima del 2030 e di dimezzare l'attuale livello di deforestazione lorda globale prima del 2020. La CE ritiene che sarà necessario un importo stimato tra 15 e 25 miliardi di euro annui per sviluppare le capacità di paesi in via di sviluppo e per fornire incentivi per contrastare la deforestazione nel limite stabilito per il 2020. Concretamente la CE, come risposta a breve termine, intende creare entro il 2013 un meccanismo mondiale del carbonio forestale (*Global Forest Carbon Mechanism, GFCM*), attraverso il quale i paesi in via di sviluppo possano essere ricompensati per le riduzioni di emissioni ottenute grazie ad una gestione sostenibile del loro patrimonio forestale con misure volte a ridurre il disboscamento (soprattutto quello illegale) e il degrado delle aree forestali.

5. Le norme internazionali relative al ruolo del settore forestale nella riduzione delle emissioni di gas serra

In una prospettiva di più lungo termine, la CE intende inserire a titolo sperimentale i crediti derivanti dalle attività forestali nel mercato europeo dei crediti di carbonio (*EU-Emissions Trading Scheme*).

Proprio dall'EU-ETS dovrebbe derivare una parte cospicua di fondi necessari per finanziare il GFCM: se il 5% delle entrate derivanti dal mercato EU-ETS fosse reso disponibile per il GFCM, potrebbero essere raccolti da 1,5 a 2,5 miliardi di euro da qui al 2020. Una prima fase "pilota" potrebbe essere attuata al fine di testare l'inclusione nei mercati del carbonio dei crediti REDD e di autorizzare i governi ad usarli nelle loro politiche di contenimento delle emissioni. A questa fase pilota iniziale, seguirebbe una seconda fase con lo scopo di inserire anche le imprese nel mercato dei crediti REDD per compensare parte delle loro emissioni dopo il 2020.

5.4 Le foreste negli interventi volontari di mitigazione del cambiamento climatico

Il calcolo del proprio "footprint" di emissioni di CO₂ e le relative misure di compensazione è divenuto negli ultimi anni uno tra i comportamenti etici più in voga sia nel settore pubblico così come in quello privato. Il problema del riscaldamento globale è oggi discusso, non solo nei meeting internazionali o tra il mondo della ricerca, ma anche nei consigli d'amministrazione delle grandi aziende o delle grandi banche. Non stupisce, infatti, il dato secondo cui il giro d'affari dei mercati volontari dei crediti di C sia passato da circa 4 milioni di dollari nel 2004 a circa 100 milioni nel 2007 (Hamilton *et al.*, 2008).

Tutto ciò si è tradotto in una proliferazione di iniziative volontarie di compensazione delle emissioni per lo più all'interno di quei paesi che non hanno assunto gli impegni vincolanti previsti dal Protocollo di Kyoto come gli Stati Uniti ed i paesi asiatici, ma in questa direzione si stanno muovendo anche l'Australia, la Nuova Zelanda ed il Canada. Una serie di agenzie di servizio sono in grado di offrire ai propri investitori una serie di interventi di compensazione che vanno da progetti di valorizzazione delle fonti energetiche rinnovabili alla realizzazione di nuove foreste. I crediti di C così generati prendono il nome di VERs (*Verified Emission Reductions*) e vengono immessi in mercati del C paralleli rispetto a quelli del CDM, della JI e ETS. Il mercato più ampio dove si scambiano i VERs è il *Chicago Climate Exchange* (CCX) dove nel 2007 sono state scambiate circa 42 Mt di CO₂ a cui si aggiungono una serie di mercati bilaterali "over the counter" (OTC) dove sono scambiate circa 65 Mt di CO₂. Tra il 2006 ed il 2007 il volume d'affari nel CCX è quasi duplicato mentre quello dei mercati OTC è quasi triplicato.

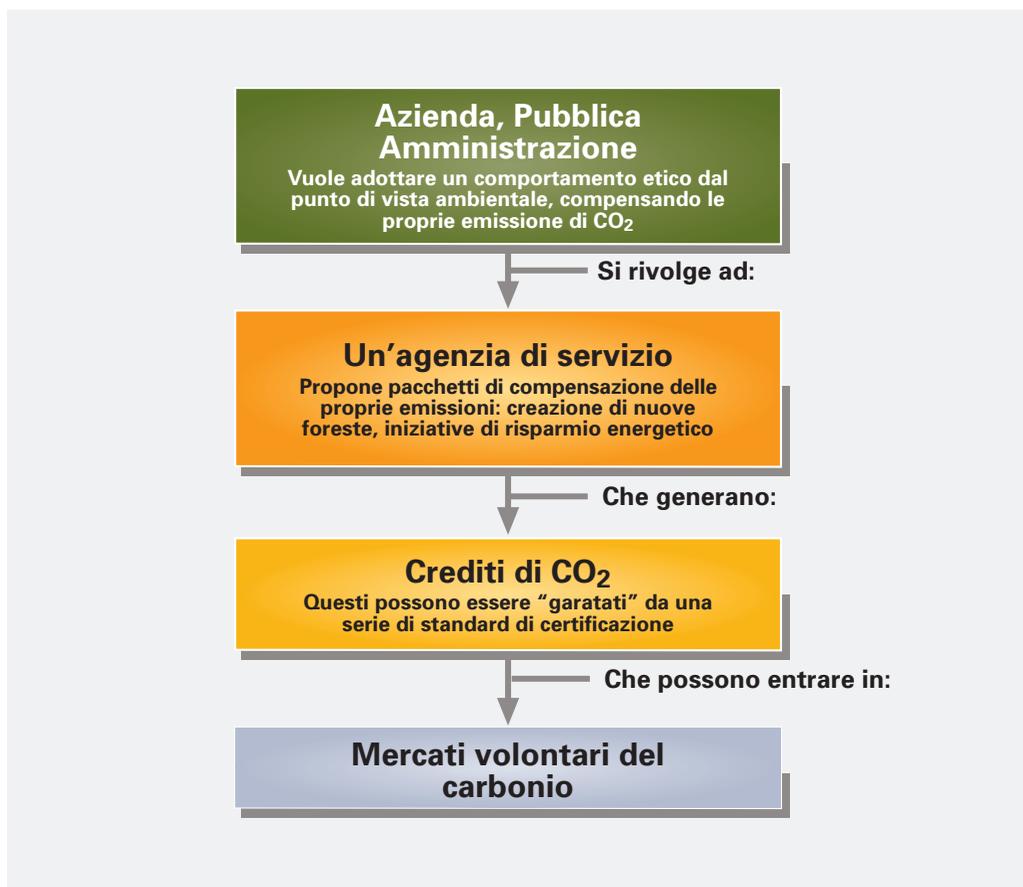


Figura 5.6 Esempificazione di iniziativa volontaria di compensazione ambientale.

Alla base di investimenti nel campo delle compensazioni delle emissioni di gas-serra vi sono motivazioni ideali per lo più legate a politiche di responsabilità sociale di impresa e di etica ambientale, ma anche più concrete logiche di *green-marketing* e di *branding* in generale; a queste si aggiunge anche l'intento di anticipare e prevenire future politiche e/o regolamentazioni obbligatorie di compensazione ambientale.

5. Le norme internazionali relative al ruolo del settore forestale nella riduzione delle emissioni di gas serra

La maggior flessibilità e soprattutto la minor restrittività dei controlli sono stati le molle del successo di queste iniziative, basti pensare che nei portfolio delle agenzie di servizio attive in questo settore hanno trovato spazio interventi nel settore forestale esclusi dal PK. Ad esempio, sono contemplati interventi di riduzione delle emissioni da progetti REDD o da misure di contenimento dell'erosione dei suoli, così come interventi di sequestro nel settore geologico non previsti dal CDM. Indicativo in tal senso è il prezzo medio molto inferiore di un VERs scambiato nel CCX nel 2007 (3,15\$) rispetto a quello di una quota ETS (circa 40\$). Nello *spread* tra un valore e l'altro sono contenute tutte le differenze relative alle metodologie di controllo, monitoraggio e validazione del credito.

Nel panorama degli investimenti di compensazione il settore forestale ha un forte "*green appeal*". Secondo il già citato rapporto Hamilton nel 2007 circa il 18% degli interventi compensativi volontari hanno interessato questo comparto, con progetti di lotta alla deforestazione (5%), di riqualificazione ambientale (<1%), di miglioramento dei suoli (3%), di realizzazione di nuove piantagioni (8%) e di ricostituzione di foreste esistenti (2%). Circa il 50% dei progetti di compensazione nel settore forestale sono stati realizzati negli Stati Uniti, in Australia e in Nuova Zelanda, solo una minima parte in America Latina e Africa, rispettivamente il 7,5% ed il 4,6%, regioni dove il problema della contrazione della superficie occupata dalle foreste è maggiormente sentito. Anomalo anche il fatto che gli interventi REDD siano per lo più concentrati in Australia e Nuova Zelanda, paesi con consolidate politiche di tutela ambientale.

Gli investimenti nei C-*sink* forestali hanno tuttavia subito una contrazione negli ultimi anni, questo come riflesso sia dalle problematiche sollevate in sede di dibattito internazionale sulla reale efficacia dei serbatoi di carbonio sia per l'innalzamento degli standard di garanzia per i VERs. Infatti, l'applicazione di norme rigorose ai progetti forestali ha portato ad un innalzamento del prezzo dei crediti da C-*sink* più che proporzionale rispetto agli altri settori delle compensazioni volontarie (trasporti o miglioramento dell'efficienza energetica), con la conseguenza di dissuadere investimenti nel comparto forestale.

Nel vario quadro degli interventi volontari la necessità di una garanzia sul beneficio apportato è sicuramente un segnale positivo. Ad oggi i principali standard per la certificazione dei crediti di carbonio sono il *Voluntary Carbon Standard*, il VER+, standard elaborato sulla base delle metodologie CDM e JI a cui si aggiunge il *Gold Standard* predisposto su iniziativa del WWF, che a differenza dei precedenti non contempla i progetti forestali.

A questo riguardo si può affermare che l'applicazione di una buona norma che attesti e quantifichi il reale contributo della misura di compensazione adottata unitamente a forme di *partnership* tra pubblico e privato dove il soggetto pubblico, senza accrescere i costi di transazione, garantisce un corretto sviluppo del mercato degli investimenti compensativi di carattere volontario possono rivelarsi strategie vincenti per una azione

efficace e condivisa. Un'altra iniziativa interessante potrebbe essere la promozione, da parte delle agenzie di servizio attive in questo settore, di interventi forestali a carattere multifunzionale all'interno dei bilanci ambientali d'impresa. Ad esempio un'azienda potrebbe finanziare interventi di miglioramento forestale, quali la conversione dei cedui invecchiati, il ripristino delle selve castanili, il rimboschimento sui tagli a raso o ancora potrebbe contribuire all'implementazione di forme gestione forestale sostenibile co-finanziando la certificazione forestale. Queste scelte, a spiccato carattere multifunzionale, consentono, tra le altre cose, anche l'incremento ed il miglioramento degli *stock* di C.

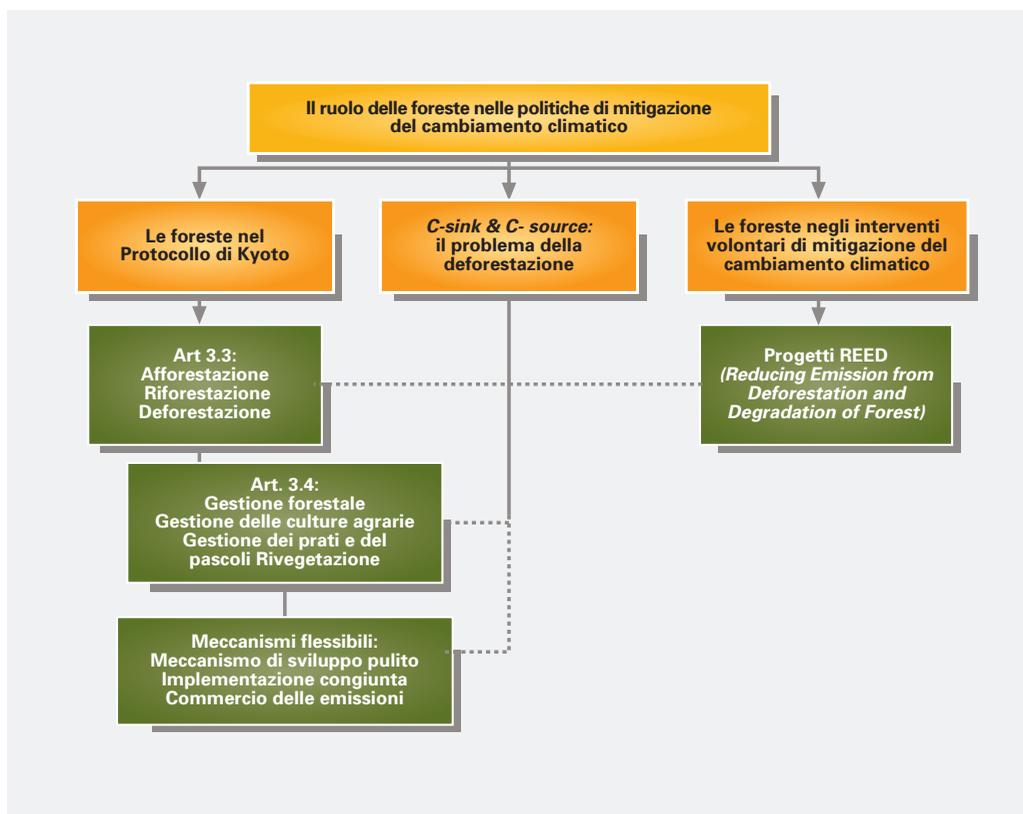


Figura 5.7 Schema sinottico del ruolo delle foreste nella riduzione delle emissioni di gas.



6

Funzione *carbon stock* e carbon pool nei sistemi forestali, nel legno e nei suoi prodotti derivati.

Marco Fioravanti

Ricerche svolte nell'ambito di importanti progetti di ricerca europei e come illustrato nei diversi capitoli di questo libro, hanno evidenziato che il ruolo di assorbitore netto di carbonio viene svolto con un grado di efficienza diversa da parte dei diversi tipi di ecosistema forestale, a seconda delle condizioni di specie, di stazione e di età dei popolamenti. In linea generale però tali studi hanno dimostrato che soprassuoli più giovani tendono a massimizzare la funzione di assorbitore netto di carbonio, mentre i popolamenti più maturi e le cosiddette foreste “*old-growth*” si trovano in una situazione di sostanziale equilibrio nello scambio di CO₂ con l'atmosfera.

A parte poche eccezioni quindi il bilancio degli scambi di CO₂ di un sistema biologico complesso quale quello forestale risulta essere, nel peggiore dei casi, in equilibrio con l'atmosfera. E' indubbio, infatti, che nel corso dei processi di crescita il carbonio viene fissato dalle componenti vegetali del sistema nelle quali può rimanere fissato (effetto *carbon pool*) per periodi diversamente lunghi.

Il modello proposto da R.C.Dewar (1991) - relativo ad uno schema molto semplificato di foresta monospecifica, periodicamente diradata e sottoposta a taglio di sgombrò con rinnovazione artificiale - descrive con molta chiarezza le dinamiche di flusso e di fissazione del carbonio di un sistema forestale (Fig 6.1). Nell'ambito di ciascun ciclo la fissazione del carbonio è rappresentata dall'incremento di biomassa dei tessuti legnosi (radici, fusto, rami degli alberi) e di quelli non legnosi (foglie e altri tessuti erbacei), ciascuno dei quali è caratterizzato da una propria dinamica di crescita e da tempi di ritorno differenziati. Al termine di ciascun turno di coltivazione, o in occasione di tagli intercalari, una parte della biomassa viene, di fatto, trasferita ai due depositi (*pools*) di carbonio di cui il sistema dispone: il legno, con i suoi prodotti derivati, ed il suolo. Da

ciascuno di questi due sistemi il carbonio ritorna in atmosfera, a seguito dei processi di decomposizione delle lettieri forestali e dei prodotti legnosi.

Questo modello aiuta ad evidenziare non solo la stretta dipendenza fra il bilancio del carbonio di una foresta trattata con la frequenza e la intensità delle utilizzazioni, ma anche con quella, certamente meno immediata, del tempo di vita dei prodotti legnosi che possono essere ricavati a seguito delle utilizzazioni.

Il legno rappresenta quindi uno dei *pool* naturali nel quale il carbonio rimane fissato, ed il cui tempo di permanenza (tempo di vita del prodotto) può avere una influenza sul bilancio dei sistemi biologici da cui esso è stato generato. Il modello di simulazione proposto da Harmon et al. (1990), relativo ad una ipotetica conversione di una foresta primigenia di Douglasia ad una foresta con turno di coltivazione di 60 anni, stabilisce che la riduzione nel contenuto di carbonio stoccato nel popolamento determinata dal cambiamento di gestione può essere compensata solo ipotizzando un raddoppiamento del tempo di vita delle abitazioni in legno.

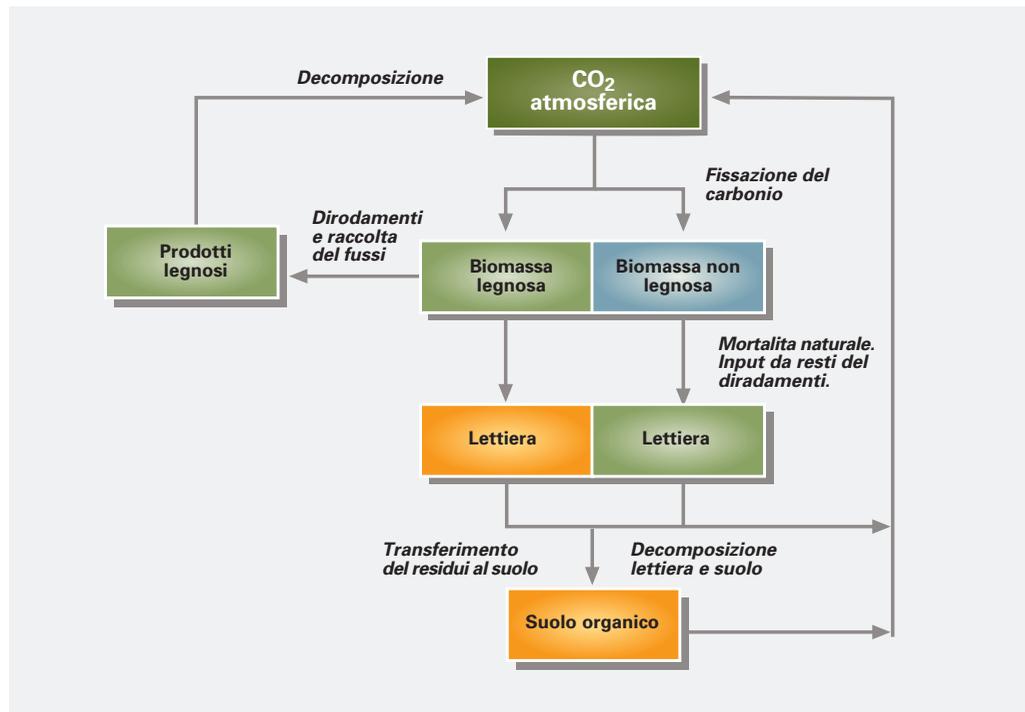


Figura 6.1 *Pool* e flussi di carbonio di una foresta monospecifica a rinnovazione artificiale (elaborato da Dewar 1991).

6. Funzione *carbon stock* e *carbon pool* nei sistemi forestali, nel legno e nei suoi prodotti derivati

Questo aspetto conferisce alle destinazioni di impiego del legno, e dei suoi prodotti derivati, un ulteriore valore ambientale, oltre a quelli che già sono riconosciuti a questo materiale in quanto materia prima e fonte di energia rinnovabile.

Impieghi che prevedono tempi di ritorno molto lunghi quali possono essere, ad esempio, quelli in edilizia (elementi strutturali, serramenti) o quelli per la realizzazione di mobili, presentano quindi un indubbio vantaggio ai fini degli equilibri descritti.

Da questo punto di vista un ruolo importante può essere svolto dal riciclaggio e dal riuso del legno. Queste attività contribuiscono ad aumentare l'efficienza interna del "sistema legno" (Fig 6.2), nel senso che una parte della domanda di prodotti derivati del legno può essere soddisfatta non attingendo dalla foresta, ma recuperando prodotti che hanno esaurito il loro ciclo di vita. In questo modo si può attuare un risparmio (o un ritardo) sui prelievi in foresta di materia prima (alberi).

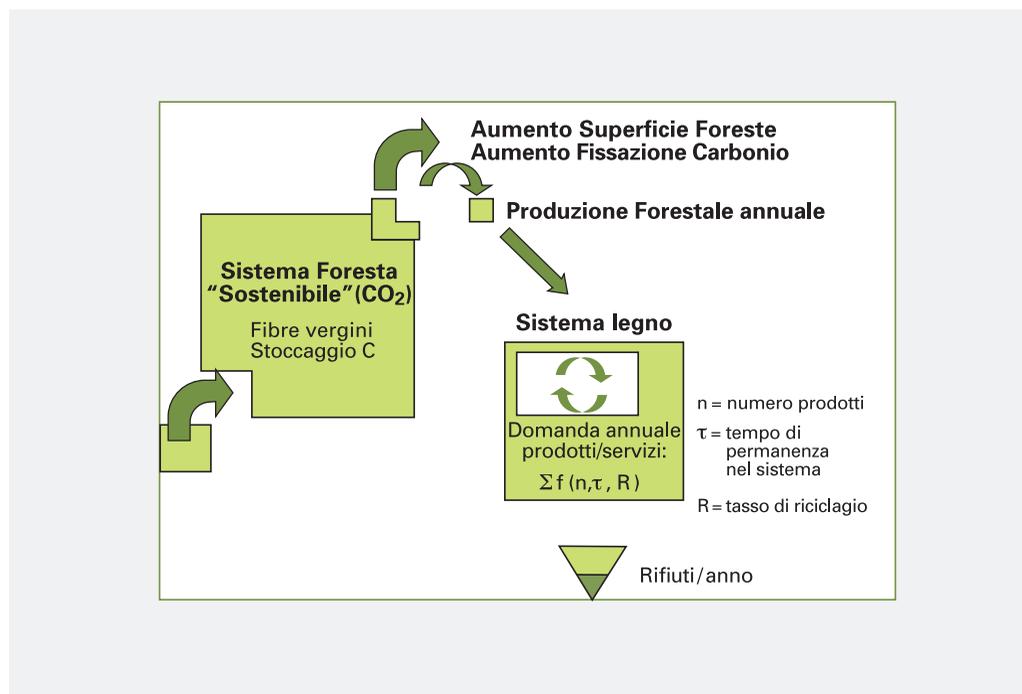


Figura 6.2. Modello della influenza del riciclaggio nelle relazioni fra prodotti derivati del legno e foresta (Fioravanti – Frankl 2002).

In Italia da alcuni anni ormai si è sviluppato un importante sistema di raccolta di legno post-consumo, che viene prevalentemente destinato all'industria dei pannelli. Il solo Consorzio Rilegno (consorzio che agisce nell'ambito del CONAI per il recupero degli imballaggi in legno) nel 2004 ha raccolto 1,4 milioni di tonnellate di rifiuti legnosi dei quali circa 650.000 provenienti da imballaggi. Nello stesso comparto operano aziende che hanno sviluppato tecnologie molto avanzate per il trattamento del materiale riciclato da destinarsi alla produzione di pannelli di particelle, ed in particolare alla messa a punto di sistemi di bonifica del legno da altri materiali e da sostanze nocive (i.e. colle) derivanti da usi precedenti.

Il riciclaggio può quindi garantire sia un prolungamento della funzione di *carbon pool* del legno, sia un prolungamento dell'azione di *carbon stock/sink* da parte degli alberi per i quali si ritarda o si evita l'abbattimento.

E' necessario, tuttavia, precisare che l'equazione 1 kg di legno riciclato 1 kg di albero "salvato", non è corretta, e che l'effetto positivo del riciclaggio venga ridotto dalle modeste caratteristiche tecnologiche dei prodotti che possono essere ottenuti impiegando materia prima proveniente da riciclo. Questi sono costituiti da alcune tipologie di pannello ottenute dalla triturazione del legno (pannelli di particelle, di fibre, OSB, ecc.), le cui caratteristiche estetiche e tecnologiche ne consentono un impiego limitato solo a certe tipologie di prodotto, mentre non possono sopperire alla domanda di prodotti con caratteristiche prestazionali superiori per le quali sarà sempre e comunque necessario ricorrere a materia prima vergine (abbattimento di alberi).

In sostanza, quindi, la disponibilità di prodotti derivati da riciclo tende ad influenzare prevalentemente la domanda di quei prodotti che da esso possono essere ottenuti (es. pannelli truciolari), ed il grado di efficienza ambientale svolto dal riciclaggio potrà essere aumentato solo se la ricerca sarà in grado di sviluppare nuovi prodotti in grado di sostituire tecnologicamente le funzioni svolte da altri prodotti derivati.

In ogni caso appare chiaro che l'efficacia della funzione di pool esercitata dal legno e dai suoi prodotti derivati, è funzione del tipo di utilizzo a cui questa risorsa viene destinata.

Il prodotto delle utilizzazioni forestali può essere considerato allo stesso tempo sia come una materia prima rinnovabile, sia come una fonte di energia primaria rinnovabile. Questi due aspetti, se da un lato stanno aumentando l'interesse intorno alle biomasse forestali, ed al legno in particolare, dall'altro aprono una dicotomia nelle potenzialità di impiego, che sta creando non pochi scompensi nel mercato del legno italiano ed europeo in generale.

I vantaggi ambientali che possono essere attribuiti a questi impieghi del legno, e, più in generale, delle biomasse, sono di pari rilevanza sia che siano utilizzati come materia prima, sia che siano impiegati come fonte di calore ed energia.

Nel primo caso può essere riconosciuto un risparmio sulle materie prime rinnovabili,

6. Funzione *carbon stock* e *carbon pool* nei sistemi forestali, nel legno e nei suoi prodotti derivati

un basso consumo energetico di processo rispetto a quello necessario per altri materiali, l'effetto di immobilizzazione nel tempo della CO₂.

A vantaggio degli usi energetici deve essere invece ascritto il risparmio che può essere fatto sui combustibili fossili, impiegando una fonte di energia che, se certi equilibri vengono rispettati, può essere considerata a bilancio nullo nel senso che la quantità di CO₂ emessa è pari a quella che, i sistemi biologici forestali e non, sono capaci di riassorbire. Se paragonato ad altre fonti fossili quindi l'impiego delle biomasse per usi energetici (Fig. 6.4), a fronte di un rendimento leggermente inferiore, mostra una quota di energia rinnovabile di oltre il 90%.



Figura 6.3 L'impiego di biomassa legnosa in diverse applicazioni (agricoltura, bioingegneria, ecc.) garantisce un prolungato effetto dell'immobilizzazione della CO₂.

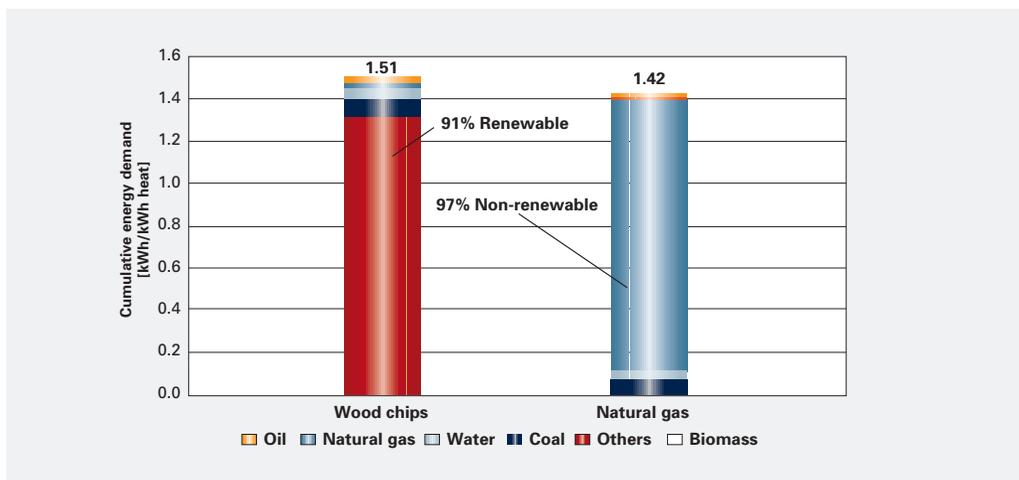


Figura 6.4 Energia cumulativa per la produzione di 1 Kw/h calore.

Fonte: Report Finale Azione COST E9 LCA Wood and Wood Products.

Se esaminiamo con maggiore dettaglio i due principali scenari di impiego del legno e delle biomasse, si evidenzia come l'andamento dei flussi di massa ed energia che vengono a stabilirsi, siano estremamente complessi e fra loro interconnessi (Fig. 6.5).

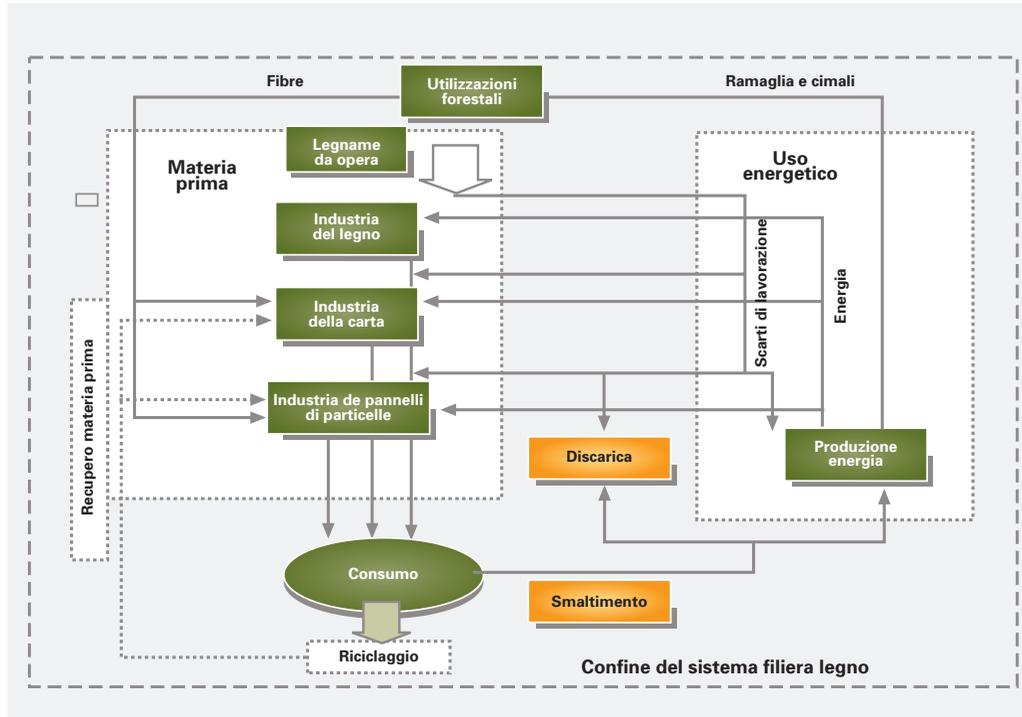


Figura 6.5 Rappresentazione schematica del sistema legno.

In linea generale si può affermare che i principali prodotti derivabili dalle utilizzazioni forestali sono indirizzati verso la trasformazione industriale per la realizzazione di prodotti derivati dal legno. Alcuni sottoprodotti (cimali e ramaglie) insieme a materiale di dimensioni ridotte o di scarsa qualità possono essere invece indirizzati (o almeno dovrebbero) sia alla produzione di carta e pannello truciolare sia alla produzione di energia. Allo stesso tempo però i processi di produzione ed il “fine vita” di prodotti derivati dal legno, possono fornire materia prima per la produzione di energia rinnovabile o per la realizzazione di co-prodotti (come ad esempio carta o pannelli di fibre o particelle). Questa stessa energia prodotta dalla biomassa può a sua volta alimentare fasi diverse dei cicli produttivi (ad esempio fornire calore per l’essiccazione artificiale del legno).

6. Funzione *carbon stock* e *carbon pool* nei sistemi forestali, nel legno e nei suoi prodotti derivati

Le numerose interazioni che si possono instaurare fra i due rami principali della filiera quindi fanno sì che questi non possano essere considerati come due sistemi isolati ma che debbano essere visti come parte di un unico sistema complesso.

La scelta di uno scenario rispetto all'altro ha però, come abbiamo visto, importanti implicazioni per gli effetti del bilancio del carbonio dei sistemi forestali, sia su quelli del bilancio complessivo della CO₂ atmosferica.

Secondo quanto attualmente previsto dal Protocollo di Kyoto, ad ogni prelievo in foresta viene associata un'emissione equivalente di CO₂ pari al quantitativo stoccato nella biomassa utilizzata. In base a questa considerazione ad ogni Paese viene assegnato un credito o un debito in base all'uso, più o meno sostenibile, che esso fa delle risorse forestali. Se si preleva per quanto la foresta è in grado di accrescersi periodicamente, il bilancio viene considerato nullo. Se i prelievi superano la capacità di rigenerazione dell'ecosistema questi tenderanno nel tempo ad esaurire la risorsa e quindi ad essi viene associato un debito. Al contrario, se i prelievi sono minori del tasso di accrescimento, al produttore spetta un credito. Il Protocollo prevede quindi l'adozione del cosiddetto "bilancio nullo", non attribuisce cioè nessun credito al legno in quanto contenitore di CO₂ immobilizzata, ma addirittura considera ogni prelievo di biomassa dalla foresta come un'emissione equivalente.

Seguendo questo criterio la valutazione comparativa degli scenari di utilizzo e di fine vita porta a considerare la combustione come scenario da privilegiare. Questo perché, qualunque sia la destinazione d'uso del legno, se ad esso viene comunque associata un'emissione equivalente, anche quando questa, di fatto, non si realizza, la soluzione più "redditizia" è rappresentata dalla combustione con recupero energetico che permette, in linea teorica, un risparmio in combustibili fossili.

Se invece si considera che la CO₂ contenuta nel legno non è ancora un'emissione, ma un quantitativo di carbonio congelato, e si attribuisce a questo un credito per la cosiddetta CO₂ biologica che ivi rimane fissata, i risultati cambiano radicalmente.

A questo proposito si riportano a titolo di esempio i risultati ottenuti da uno studio di LCA⁴ applicato al confronto degli scenari di fine vita di legno per imballaggi in Italia.

Se si contabilizza la CO₂ seguendo i criteri sopra descritti, lo scenario di smaltimento da preferire, fra quelli considerati (discarica, combustione, riciclaggio), risulta sempre

⁴ LCA (Life Cycle Analysis/Assessment), è una metodologia comunemente riconosciuta dalla comunità scientifica come utile strumento di valutazione della eco-efficienza produttiva al fine di realizzare una riduzione del consumo di risorse ed energie e minimizzare gli impatti ambientali. Con questa metodica i processi produttivi vengono esaminati seguendo passo dopo passo il percorso seguito dalle materie prime dalla loro estrazione, attraverso le trasformazioni ed i trasporti che queste subiscono fino allo smaltimento finale del prodotto alla fine del suo ciclo di vita, con un approccio che viene definito dalla "culla alla tomba".

quello della combustione per uso energetico (Fig. 6.6). Introducendo invece il criterio del credito della CO₂ biologica⁵, il riciclaggio, che consente di mantenere la CO₂ fissata nel legno per tempi diversamente lunghi, diventa uno scenario di fine vita che può produrre significativi benefici ambientali sia rispetto alla combustione, che porta all'immediata liberazione della CO₂ con perdita dello stock ad esso associato, sia rispetto al conferimento a discarica controllata, che produce sostanzialmente lo stesso effetto ma con tempi più lunghi poiché la liberazione in atmosfera dell'anidride carbonica avviene per effetto della lenta degradazione della sostanza organica (circa

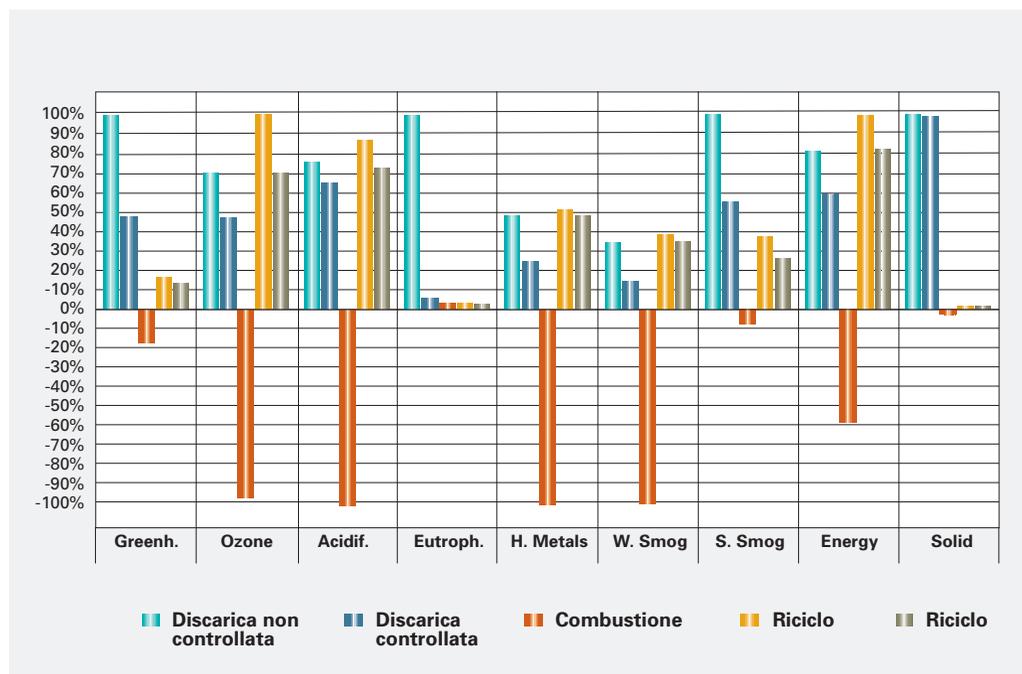


Figura 6.6 Confronto scenari di fine vita col metodo del bilancio nullo della CO₂ applicato ad uno studio di LCA eseguito su imballaggi in legno in Italia - (le colonne al di sotto dello 0 indicano impatti positivi per l'ambiente).

⁵ La CO₂ biologica è la parte di anidride carbonica sottratta all'atmosfera e fissata nelle fibre degli organismi vegetali attraverso la fotosintesi. Può quindi essere quantificata ed associata ad ogni prodotto derivante da fotosintesi e considerata come una "dotazione" di quel determinato materiale, come un vero e proprio carbon stock. Si distingue dalla CO₂ fossile, termine con il quale si indica l'anidride carbonica derivante dalla mineralizzazione della sostanza organica e contenuta nei combustibili fossili (petrolio, carbone, ecc.) che la sprigionano in seguito alla loro combustione.

6. Funzione *carbon stock* e *carbon pool* nei sistemi forestali, nel legno e nei suoi prodotti derivati

il 33% del contenuto iniziale di carbonio viene rilasciato in 100 anni sotto forma di metano che produce un effetto serra 21 volte superiore a quello della CO₂) (Fig 6.7).

Implicitamente quindi il metodo del bilancio nullo, attualmente previsto dalle Linee Guida dell'IPCC, assume che la variabile tempo non abbia influenza, e che gli scenari tecnologici ed ambientali si mantengano tali anche in futuro. Trattandosi di processi che contemplan trasformazioni energetiche di tipo termodinamico (degradamento dell'energia conseguente alla combustione) la mancata considerazione dell'effetto del tempo rappresenta, di per sé, una questione aperta, ma soprattutto, con questo metodo non si considerano gli effetti che i tempi di ritorno in atmosfera della CO₂ contenuta nel legno e nei suoi prodotti derivati, possono esercitare sul bilancio dei flussi degli ecosistemi forestali. Se si considera invece il potenziale credito di CO₂ dei prodotti in legno, l'importanza di questo *pool* naturale diviene tutt'altro che trascurabile, alla stregua dei grandi *sink* rappresentati dalle foreste. Una valutazione più obiettiva dei vantaggi ambientali che possono derivare da usi alternativi della risorsa legno, può essere fatta solo considerando un approccio meno semplicistico al problema, introducendo anche la valutazione dell'effetto *carbon pool* del legno.

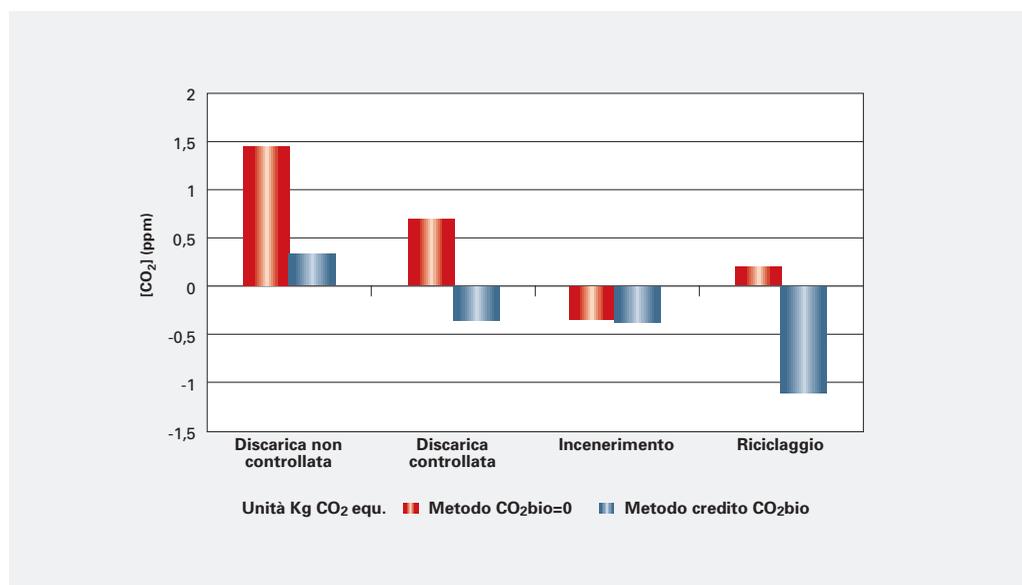


Figura 6.7 Comparazione dei due metodi di calcolo a confronto: con il metodo del bilancio nullo la combustione risulta lo scenario di fine vita più vantaggioso, mentre introducendo il criterio del credito di CO₂ i vantaggi del riciclaggio risultano evidenti.

Nel maggio del 1998 a Dakar, in Senegal, è stato fatto il primo passo in direzione del riconoscimento dei limiti delle Linee Guida dell'IPCC sul problema dei prodotti legnosi (HWP, *harvested wood products*) con la proposta dello stesso IPCC di tre nuovi approcci per contabilizzare il carbonio contenuto nel legno, denominati rispettivamente *stock change*, *production* e *atmospheric flow* (Fig. 6.8).

Stock change approach

Questo criterio stima le variazioni nette negli *stock* di carbonio nelle foreste e nei prodotti legnosi. Le variazioni dello *stock* di carbonio nelle foreste sono contabilizzate a favore del paese nel quale il legno è cresciuto, riferendosi al paese produttore. Le variazioni dello *stock* di carbonio nei prodotti vengono invece contabilizzate nel paese dove tali prodotti vengono utilizzati e quindi smaltiti, riferendosi quindi al paese consumatore. Queste variazioni di *stock* vengono contabilizzate dove e quando esse avvengono.

Production approach

Con questo criterio si stimano le variazioni nette negli *stock* di carbonio nelle foreste e nei prodotti legnosi, ma attribuisce entrambe al Paese produttore. Questo approccio include solo gli *stock* prodotti all'interno del paese e non fornisce un inventario completo degli *stock* nazionali. Le variazioni di *stock* vengono quindi contabilizzate quando, ma non dove avvengono.

Atmospheric flow approach

Contabilizza le emissioni e le rimozioni nette del carbonio verso e dall'atmosfera all'interno dei confini nazionali, dove e quando queste avvengono. La rimozione del carbonio dall'atmosfera dovuta alla crescita delle foreste viene contabilizzata nel paese produttore mentre le emissioni di carbonio verso l'atmosfera dovute al processo di ossidazione dei prodotti legnosi vengono contabilizzate nel paese consumatore. (*simile allo stock change approach*, ma più dettagliato).

Sulla base di questi nuovi approcci alcuni Paesi hanno già iniziato a valutare i loro *pool*, nell'attesa che questi vengano riconosciuti e che possano quindi essere contabilizzati negli inventari richiesti dal Protocollo di Kyoto.

6. Funzione *carbon stock* e *carbon pool* nei sistemi forestali, nel legno e nei suoi prodotti derivati

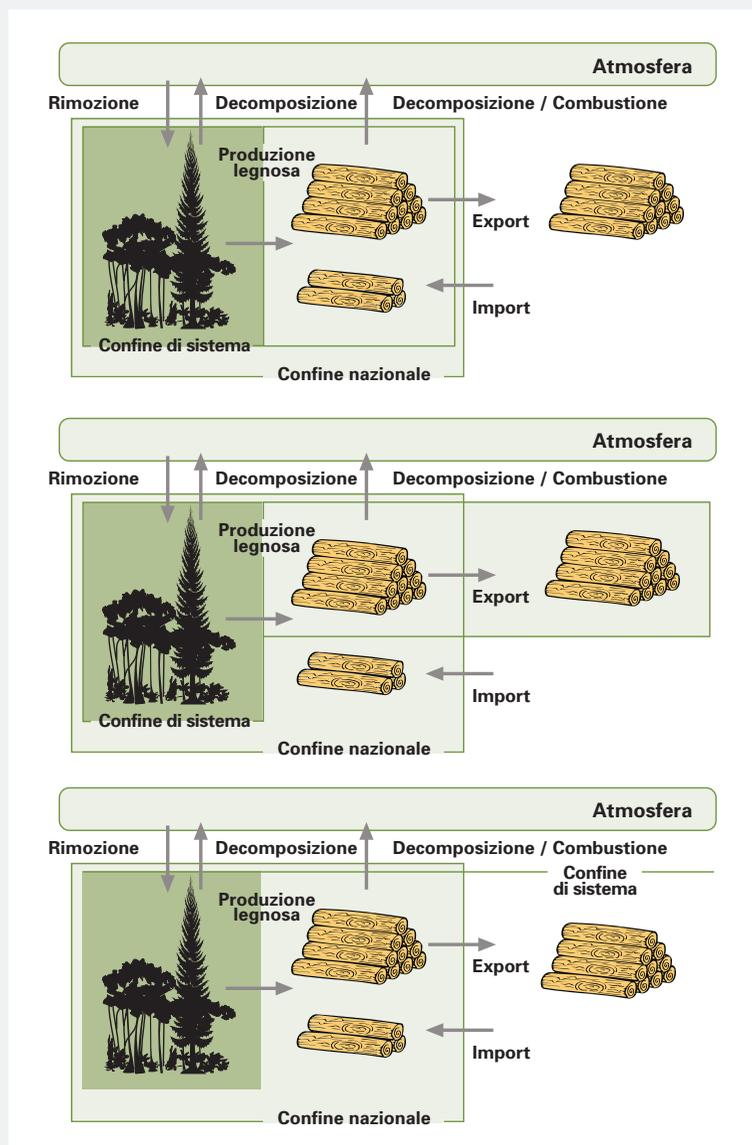


Figura 6.8 Schemi riassuntivi dei diversi metodi per contabilizzare l'effetto *carbon pool*: superiore *Production approach*, mediano *change approach*, inferiore *atmospheric approach* (da S. Hashimoto et al. 2002).

Applicando questi criteri a dati primari pubblicati dall’Australia, ad esempio, (Tab. 6.1), è possibile evidenziare le differenze che si determinano a seconda che l’effetto di *pool* venga considerato o meno: nel primo caso le emissioni presunte (5,7 MT di C nel 1998) dal metodo IPCC sovrastimano le emissioni reali (3,6 Mt di C nel 1998), determinate impiegando il criterio dello *stock change approach*, di circa il 36%.

Hashimoto *et al.* (2002) utilizzando i tre diversi criteri proposti dall’IPCC, ha effettuato una stima del *pool* di legno per i 16 Paesi contenuti nell’allegato I del protocollo di Kyoto per il periodo 1990-99. Pur trattandosi di stime fondate su una base dati che può essere affinata, i risultati sono molto interessanti e per l’Italia indicano un aumento dello stock di carbonio, escluso quello da attribuire ai sistemi forestali, per il periodo di riferimento di circa 500.000 t, valore questo che avrebbe consentito di coprire una quota rilevante dell’impegno di riduzione assunto con la firma del protocollo (anche se è prevalente l’opinione di considerare premiante solo le azioni di aumento di stock che siano conseguenti a politiche attive esercitate dai diversi governi (esempio incentivi sull’uso del legno in settori specifici).

Australia 1998	IPCC (Mt C)	Production (Mt C)	Stock change (Mt C)
<i>Pool</i> esistente		58.9	65.7
Incremento nel <i>pool</i> dei prodotti		5.7	4.1
Diminuzione nel <i>pool</i> dei prodotti per dismissione		-4.9	-3.6
<i>Pool</i> a fine anno		59.7	69.2
Emissione al taglio	-5.7		
Emissioni dovute alle variazioni nel <i>pool</i>		-4.9	-3.6

Tabella 6.1 Dati *pool* prodotti in legno Australia 1998 (i valori preceduti dal segno meno indicano emissione).

6. Funzione *carbon stock* e *carbon pool* nei sistemi forestali, nel legno e nei suoi prodotti derivati

Molto più recentemente sono stati effettuati anche bilanci del carbonio bloccato nei prodotti legnosi che tentano di assegnare un possibile valore economico a queste riserve (in un recente studio relativo alla Finlandia Laturi *et al.* (2008) attribuiscono un valore di 15 €/t di carbonio stoccato nei prodotti derivati del legno). E' ovvio che, analogamente a quanto già accade per la stima dei quantitativi di Carbonio nei *sink* forestali, un riconoscimento sovranazionale della funzione di carbon pool esercitata dal legno, può avvenire solo mediante la realizzazione di inventari accurati dei flussi di materiale nell'ambito di ciascun Paese.

Da questo punto di vista in Italia molto deve essere ancora fatto, e non è stata ancora impostata una base di raccolta dei dati che consenta di stimare, per i vari comparti della filiera del legno, i bilanci di flusso. Si tratta certamente di un lavoro di non facile attuazione stante la complessità della realtà di un Paese dove il settore di trasformazione del legno è molto diffuso e caratterizzato da un numero molto rilevante di aziende di piccole e talvolta piccolissime dimensioni, con processi di trasformazione fortemente differenziati. Mentre sono disponibili serie storiche relative ai macro flussi (es. legno tondo, segati, pannelli, mobili), manca ancora la possibilità di rilevare le complesse diramazioni e le interazioni delle linee di flusso relative ai diversi prodotti derivati del legno ed ai numerosi prodotti finiti per i quali questi sono impiegati.

Senza un affinamento dei macro dati già disponibili – peraltro molto frammentari nelle loro classificazioni merceologiche - non appare possibile valutare in modo obiettivo le potenzialità offerte dall'effetto carbon pool del legno e dei suoi prodotti derivati nei riguardi del bilancio del carbonio e soprattutto nell'aiutare a determinare la migliore forma di gestione dei prodotti in legno, a stabilire le linee guida da seguire per ottimizzare il loro uso ed il loro smaltimento, ed alla definizione delle relazioni con i sistemi biologici complessi di origine.





7

Inventario forestale nazionale (INFC) e ruolo delle piantagioni forestali.

Giovanni Tabacchi, Massimo Bianchi, Patrizia Gasparini, Giuseppe Notarangelo
(paragrafi da 7.1 a 7.6)

Gianfranco Minotta, Giovanni Sanesi, Giuseppe Colangelo, Raffaele Laforteza
(paragrafi da 7.7 a 7.9)

7.1 Introduzione

Fino a non molti anni fa, gli inventari forestali su ampie superfici erano prevalentemente dedicati all'acquisizione delle informazioni relative ad alcuni aspetti produttivi dei boschi, quali ad esempio la fitomassa legnosa presente, i ritmi di accrescimento nel tempo, l'entità del materiale legnoso di interesse commerciale presente e di quello asportato con le utilizzazioni forestali, le caratteristiche topografiche delle aree boscate, la loro accessibilità, l'articolazione della proprietà.

Più recentemente, le esigenze emergenti della politica forestale e ambientale hanno determinato la necessità di una caratterizzazione qualitativa e quantitativa delle risorse forestali per aspetti diversi da quelli meramente produttivi, quali ad esempio lo stato sanitario dei popolamenti forestali, il loro valore naturalistico, la funzione di habitat per la fauna selvatica, l'attitudine alla fruizione turistica e ricreativa delle aree boscate.

Queste nuove esigenze comportano ovviamente una modificazione dell'insieme degli attributi che devono essere osservati con il rilevamento inventariale, ma spesso determinano anche la necessità di implementazione di nuove procedure di acquisizione delle informazioni attualmente ritenute di interesse nell'ambito degli inventari su ampie superfici.

Oltre che dalle necessità informative, il disegno complessivo di un inventario forestale che interessa grandi territori risulta influenzato da vari altri fattori. Il primo di questi riguarda le principali finalità dell'indagine inventariale che possono essere limitate

ad un'azione di tipo esplorativo e di ricognizione, oppure puntare all'acquisizione delle conoscenze necessarie per azioni di pianificazione e di gestione o, con orizzonti temporali più ampi, ad azioni di monitoraggio forestale e ambientale.

Un secondo fattore attiene alle procedure da adottare e alle fonti di informazione già disponibili. Le informazioni inventariali possono, infatti, essere ottenute mediante osservazioni e misure condotte esclusivamente sul terreno oppure utilizzando immagini acquisite con attività di telerilevamento. L'approccio che prevede esclusivamente un rilievo di campo è ritenuto in genere poco efficiente, mentre dal lato opposto una rilevazione esclusivamente "remota" può evidenziare anche grossolane approssimazioni sia nelle classificazioni specifiche sia nelle determinazioni quali-quantitative corrispondenti.

È ormai ampiamente condiviso che le modalità di osservazione considerate più efficienti e accurate si basano sull'impiego di procedure in cui le immagini rilevate in remoto sono utilizzate per le classificazioni dell'uso del suolo e del tipo di copertura forestale, per la ripartizione in insiemi omogenei delle formazioni forestali e, quindi, per la misura o la stima dell'estensione territoriale di tali entità, affiancando ad esse osservazioni e misurazioni condotte direttamente sul terreno per acquisire le informazioni necessarie per descrivere lo stato dei soprassuoli forestali e delle stazioni in cui essi vegetano.

Un altro fattore di rilievo nel disegno di un inventario forestale su ampie superfici riguarda le modalità di osservazione della popolazione in esame, rispetto alle quali va nettamente distinto l'approccio di tipo campionario, secondo il quale viene individuato e rilevato secondo rigorosi schemi stocastici un sottoinsieme limitato (campione) di detta popolazione e da questo si traggono risultanze e conclusioni valide per la sua totalità, da quello di tipo censuario in cui tutte le unità della popolazione vanno individuate e misurate. Per gli inventari che interessano grandi estensioni territoriali, l'approccio campionario è sempre privilegiato poiché esso, da un lato, permette di ottenere informazioni in tempi più brevi e a costi più contenuti e, dall'altro lato, concentrando l'indagine solo su una frazione della popolazione, offre la possibilità di effettuare osservazioni molto accurate e numerose in termini di attributi e caratteristiche da misurare con l'impiego di personale appositamente addestrato e il cui lavoro può essere facilmente organizzato e controllato. Per territori molto vasti come quelli di una regione o di un'intera nazione, l'adozione di un procedimento inventariale basato sul campionamento è difficilmente eludibile.

Altri fattori che possono influire in maniera rilevante sui costi di inventariazione e quindi sul disegno inventariale adottabile riguardano gli standard di precisione prescelti, l'estensione complessiva del territorio da osservare e la dimensione minima delle unità di evidenziazione dei risultati. I costi di realizzazione di un inventario, infatti, crescono all'aumentare del dettaglio informativo richiesto e all'aumentare della precisione dei risultati prescelta o, con altre parole, al diminuire delle incertezze campionarie tollerate. Gli stessi crescono, infine, con la necessità o la scelta di addivenire

7. Inventario Forestale Nazionale (INFC) e ruolo delle piantagioni forestal

a stime indipendenti e statisticamente accettabili per ripartizioni geografiche, ecologiche o amministrative che frazionino l'intero territorio osservato.

Il disegno complessivo di un inventario forestale scaturisce dunque dall'esame e dal confronto tra obiettivi da raggiungere e procedure e strumenti che effettivamente è possibile impiegare, con attenzione ai costi da sostenere nell'ambito di ciascuna opzione.

Per quanto attiene alle informazioni attese dall'indagine inventariale, si possono qui dare solo alcune indicazioni a titolo di esempio, dato il gran numero di attributi osservati nei diversi momenti dell'indagine. I risultati che in genere riscuotono più interesse sono quelli relativi all'estensione, totale e per suddivisioni categoriche, del territorio e ovviamente della sua parte boscata. Tra questi si segnalano, a titolo di esempio, le stime di estensione relative alle ripartizioni del territorio per classi di uso e di copertura forestale e quelle relative alle ripartizioni della superficie forestale secondo categorie compositive, colturali e strutturali, classi di densità e di età dei soprassuoli, modalità dei caratteri fisici del territorio, vincoli territoriali e di protezione ed infine forme di proprietà e di uso prevalente.



Figura 7.1 Bosco quercino a prevalenza di Cerro e Farnetto (Bosco Difesa grande – Puglia).

A questo tipo di risultati vanno naturalmente associati quelli che esprimono lo stato e la consistenza delle formazioni forestali, quali ad esempio il numero degli alberi, la fitomassa arborea viva presente, il volume legnoso commerciale, l'incremento corrente annuo della fitomassa arborea viva, la fitomassa legnosa morta, sia in piedi sia a terra, la massa dei detriti legnosi di piccole dimensioni dispersi sul terreno. Inoltre, per le necessità di rendicontazione determinate dalla sottoscrizione di accordi soprannazionali relativi alla conservazione degli ecosistemi forestali e alla mitigazione delle modificazioni climatiche in corso, la stima della quantità di carbonio presente nella fitomassa arborea viva, nella necromassa, nella lettiera e nella parte organica del suolo diventa uno dei risultati inventariali più importanti.

Numerosi e consistenti insiemi di risultati scaturiscono poi da specifiche e interessanti intersezioni tra diversi attributi, modalità e ripartizioni territoriali.

La breve sintesi introduttiva sui possibili approcci metodologici per un inventario forestale su ampie superfici e sulle risultanze attese da questo tipo di indagini statistiche, permette di intravedere i principali elementi considerati per una idonea progettazione e realizzazione del secondo inventario forestale nazionale italiano e di comprendere, nei suoi elementi essenziali, il disegno di inventariazione forestale adottato e sin qui succintamente descritto.



Figura 7.2 Formazioni forestali in aree caratterizzate da consistente degrado dal punto di vista pedologico.

7. Inventario Forestale Nazionale (INFC) e ruolo delle piantagioni forestal

Con riferimento al secondo inventario forestale nazionale italiano denominato Inventario Nazionale delle Foreste e dei serbatoi forestali di Carbonio (INFC), sono brevemente riassunti di seguito lo schema di campionamento impiegato, le procedure di navigazione e di posizionamento sul terreno dei punti di osservazione e di misura, gli attributi osservati nelle diverse fasi campionarie e i principali risultati che tali osservazioni hanno generato. La trattazione completa e dettagliata di questi argomenti e di tutti i necessari approfondimenti teorici, procedurali, tecnici e organizzativi, è disponibile nell'ampia documentazione di progetto ed esecutiva appositamente predisposta ed elencata in bibliografia, ed è accessibile sul sito istituzionale dell'inventario www.infc.it.

L'indagine è stata finanziata e coordinata dal Corpo Forestale dello Stato che ha anche eseguito tutti i rilievi; l'Unità di ricerca per il Monitoraggio e la Pianificazione forestale del Consiglio per la Ricerca e la sperimentazione in Agricoltura ha curato la progettazione dello schema di campionamento e dei protocolli di rilievo, la formazione dei rilevatori, il controllo di qualità, le elaborazioni e la presentazione dei risultati. La progettazione e gestione degli archivi e di tutti gli aspetti informatici (software, flusso dei dati, ecc.) sono state affidate invece ad una società esterna.

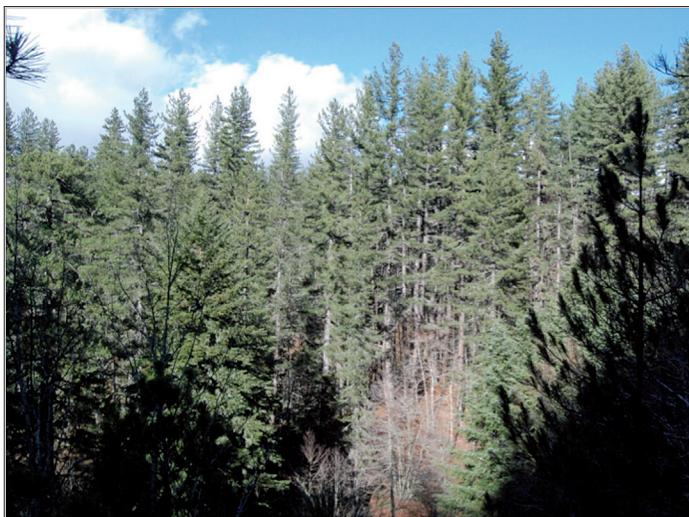


Figura 7.3 Boschi di Pino laricio (Sila).

7.2 Lo schema di campionamento

L'approccio campionario adottato per l'inventario forestale nazionale italiano è riferibile alla categoria del campionamento probabilistico articolato in più fasi e afferisce allo schema generalmente indicato come campionamento doppio per la stratificazione, anche se in questo particolare caso la prima fase dello schema classico è articolata in due diversi momenti di campionamento. Il disegno inventariale prevede, infatti, la costituzione di tre insiemi campionari (Fig. 7.5), i primi due necessari per la stima della superficie forestale e della sua ripartizione in categorie inventariali (boschi, boschi radi, arbusteti, piantagioni, ecc.) e in categorie forestali (boschi di larice e cembro, boschi di abete rosso, boschi di faggio, ecc.), mentre il terzo insieme è impiegato per la raccolta delle informazioni dendro-auxometriche relative alle formazioni forestali al fine di stimare i valori totali di strato e i valori medi per unità di superficie dei vari attributi quantitativi di interesse inventariale.

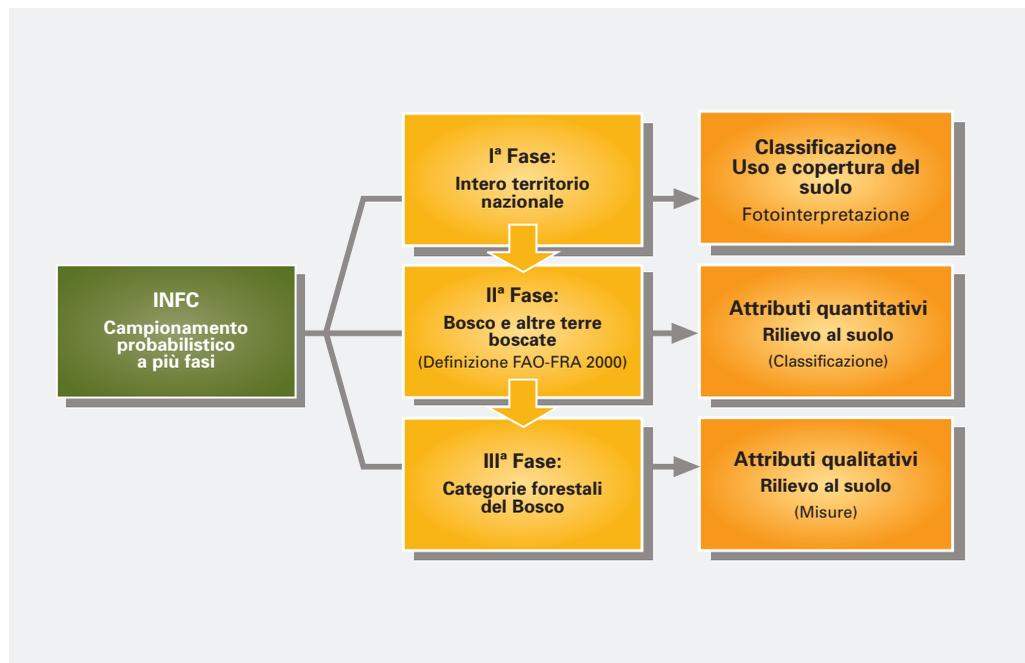


Figura 7.4 Quadro sinottico dello schema di campionamento impiegato nell'ultimo inventario forestale nazionale.

7. Inventario Forestale Nazionale (INFC) e ruolo delle piantagioni forestal

Il campione di prima fase è costituito da oltre 301.000 punti di sondaggio, distribuiti sull'intero territorio nazionale secondo uno schema campionario di tipo sistematico non allineato, realizzato tramite un reticolo a maglie quadrate di 1 km di lato, con un punto di campionamento posizionato casualmente entro ogni maglia. I punti di campionamento sono visualizzati su ortofoto digitali in bianco e nero e sono classificati per fotointerpretazione nelle principali classi di uso e di copertura del suolo o strati. Il numero di punti assegnati alle diverse classi rispetto al numero totale dei punti di sondaggio consente di stimare l'estensione delle classi di uso e di copertura del suolo, per singola regione e per l'intera nazione. Da tali insiemi di punti sono poi estratti i sottocampioni necessari per le successive fasi di campionamento.

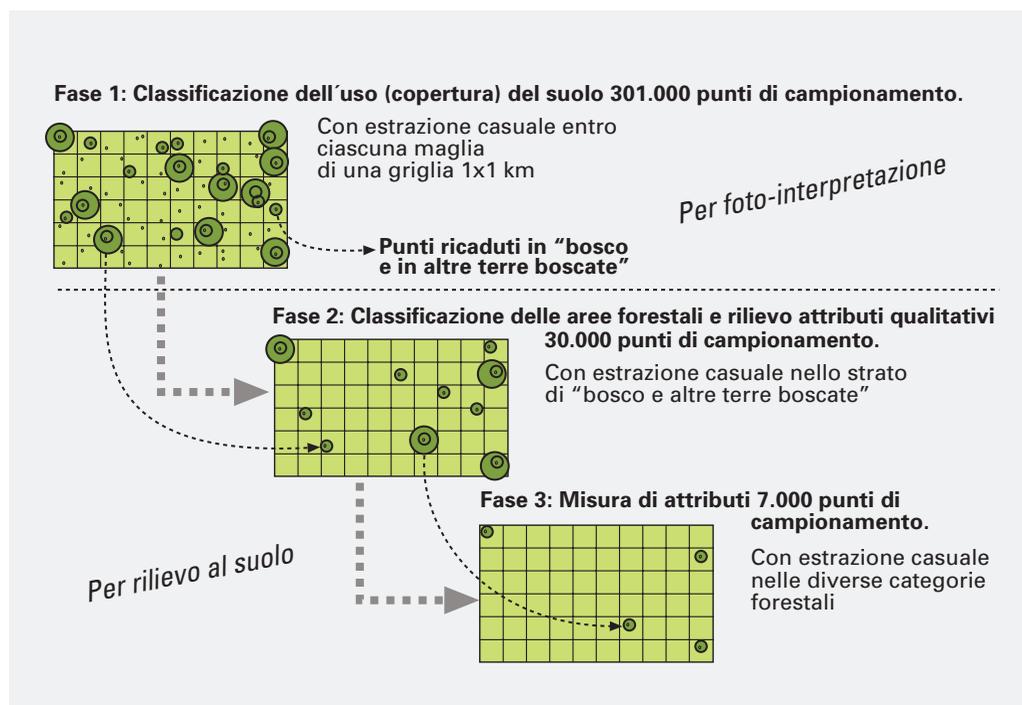


Figura 7.5 Schema di campionamento a tre fasi impiegato per l'inventario forestale nazionale.

Nella seconda fase viene selezionato un sottoinsieme casuale dei punti di campionamento assegnati - nella fase precedente - agli strati di interesse inventariale, principalmente riferibili a “foreste e altre terre boscate”. La selezione di questi punti avviene su base regionale assegnando a ciascuna unità amministrativa (ventuno unità tra regioni e province autonome) un numero di punti proporzionale al peso dello strato di interesse forestale di ogni singola regione rispetto al totale nazionale. I circa 30.000 punti del campione di seconda fase sono raggiunti e posizionati al suolo e sono oggetto di osservazioni dirette al fine della conferma o della modifica della classificazione operata in prima fase. Inoltre l'osservazione al suolo permette: i) di discriminare il bosco dalle altre classi di terre boscate (arbusteti, boschi radi e boschi bassi); ii) di identificare le categorie e le sottocategorie forestali; iii) di raccogliere le informazioni necessarie per una descrizione qualitativa delle cenosi forestali, delle stazioni di vegetazione e dei contesti amministrativi e gestionali. Sulla base della numerosità dei vari sottoinsiemi di punti di sondaggio e di quella delle classi di provenienza di prima fase, è possibile produrre le stime definitive delle proporzioni, e quindi delle estensioni, di territorio regionale e nazionale interessato dalle diverse classi e categorie di copertura forestale e della loro ripartizione secondo le varie modalità di articolazione degli attributi qualitativi di interesse inventariale.

Il campione di terza fase, infine, è costituito da circa 6.700 punti di sondaggio selezionati dagli insiemi di punti assegnati in seconda fase alle varie categorie di bosco. Anche in questo caso il campione è selezionato secondo criteri di casualità e di proporzionalità con l'estensione degli strati a cui afferisce per singolo distretto territoriale (regione o provincia autonoma). Il campione di terza fase è necessario per l'esecuzione delle rilevazioni dendrometriche e per la raccolta delle informazioni quantitative relative al legno morto, alla vegetazione arbustiva, al prelievo legnoso e ad alcuni altri attributi. Con tali informazioni è possibile stimare i valori totali e medi di strato per tutti gli attributi considerati.

Le informazioni raccolte con il campione di terza fase non sono però sufficienti per le determinazioni sul contenuto di carbonio di tutte le componenti degli ecosistemi forestali secondo l'articolazione prescritta dagli accordi internazionali, che prevede la stima del carbonio presente e le sue variazioni nel tempo per i seguenti cinque serbatoi forestali: la fitomassa arborea epigea, la fitomassa arborea ipogea, la necromassa, la lettiera e la componente organica del suolo. La raccolta delle informazioni necessarie per tali stime è stata considerata troppo onerosa per un insieme campionario così numeroso come quello di terza fase.

Attualmente è in corso il rilevamento delle grandezze necessarie al completamento delle stime del contenuto di carbonio nella componente arborea di piccole e piccolissime dimensioni, nella necromassa fine, nella lettiera e nel suolo. A tal fine è stato selezionato un ulteriore campione di terza fase, di dimensioni più contenute (circa 1.500 unità di osservazione), analogo al precedente e del tutto integrato e compatibile con il disegno di campionamento che sta alla base del progetto inventariale.

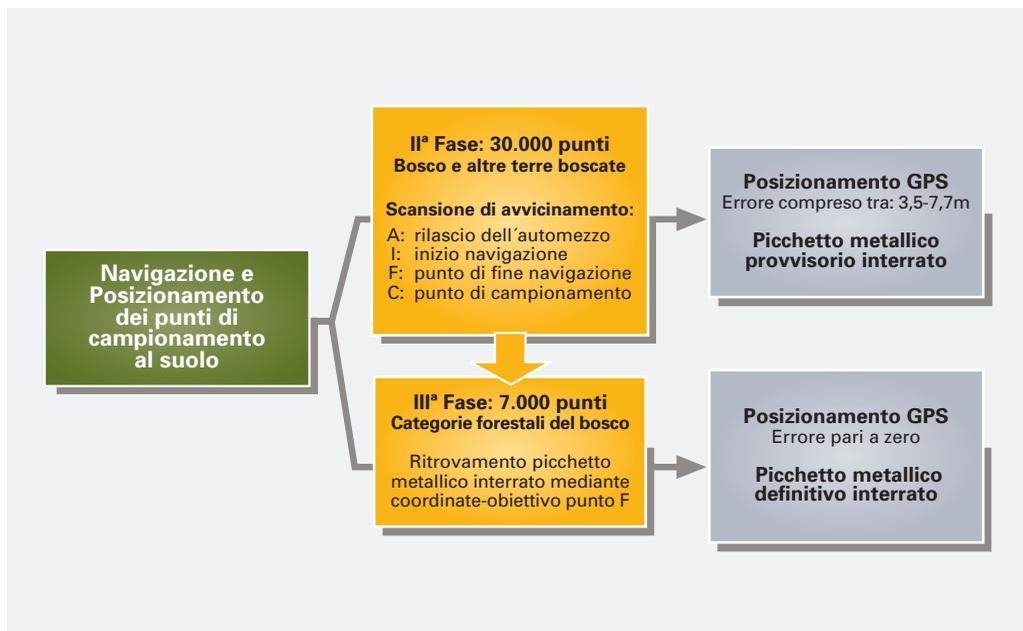


Figura 7.6 Schema sinottico delle attività necessarie al completamento delle fasi di acquisizione dei dati.

7.3 Le procedure di navigazione e di posizionamento dei punti di campionamento al suolo

Per l'individuazione sul terreno dei punti di campionamento INFC è previsto l'impiego di una procedura basata principalmente su tecniche di radioposizionamento satellitare, integrata all'occorrenza dall'utilizzo di metodi tradizionali (poligonale aperta). In particolare, la tecnologia GPS (*Global Positioning System*) viene impiegata sia per recarsi in prossimità dei punti di campionamento (procedura di navigazione) sia per la materializzazione finale della loro reale posizione al suolo (procedura di posizionamento).

Nella seconda fase dell'inventario, la procedura è rivolta ad individuare sul terreno i circa 30.000 punti estratti casualmente fra quelli che in prima fase sono stati classificati

come appartenenti ad aree di interesse forestale. Tali punti vengono prima materializzati con picchetto metallico provvisorio dotato di piastrina in alluminio. Questi picchetti sono poi completamente interrati rendendoli così non visibili.

Nella terza fase, la procedura è invece rivolta a ritrovare un sottoinsieme di tali punti (quasi 7.000), con individuazione effettiva del picchetto metallico anche mediante metal detector. Il ritrovamento dei punti viene facilitato da alcuni accorgimenti pratici (segnalazioni con pitturazione fino a una certa distanza dal punto, piccole piastrine metalliche posizionate alla base di due-tre alberi circostanti) e, naturalmente, dal fatto di disporre di coordinate precise, derivanti dalle coordinate medie GPS rilevate stazionariamente all'atto della materializzazione del punto di campionamento durante la seconda fase.

Poiché il radioposizionamento GPS è una procedura influenzata comunque da errore (specialmente in presenza di copertura arborea), le coordinate reali dei punti materializzati sul terreno presentano un certo scostamento rispetto a quelle nominali stabilite dal disegno di campionamento. Tali scostamenti sono previsti, al livello fiduciale del 90% (9 probabilità su 10), entro un intervallo compreso tra 3.5 e 7.7 m, a seconda della qualità del ricevitore GPS impiegato.

Il dettaglio delle operazioni di navigazione e posizionamento dei punti nella seconda fase prevede che, date le coordinate planimetriche teoriche di uno specifico punto di campionamento (note in base al disegno campionario), l'obiettivo della procedura sia quello di raggiungere sul terreno il punto avente tali coordinate nominali, di materializzarlo e di rilevare la posizione così materializzata, con il minor errore possibile. Nelle situazioni ordinarie di rilievo (Fig. 7.7), che riguardano la grande maggioranza dei casi, la procedura prevede una "scansione di avvicinamento" articolata nell'individuazione dei punti cospicui A (punto di rilascio dell'automezzo), F (punto di fine navigazione) e C (punto di campionamento); mentre, in determinate circostanze, tra i punti A e F è prevista anche l'individuazione di un punto cospicuo I (punto di inizio navigazione).

Appare opportuno sottolineare l'importanza del punto F (o di fine navigazione) nel quadro descritto: F è prossimo al punto di campionamento C, ma si trova distanziato da questo di 15-20 m. L'individuazione di un punto di fine navigazione permette di escludere qualsiasi discrezionalità nella definizione della posizione del punto di campionamento C e di utilizzare al meglio il GPS, dando all'operatore la possibilità di reperire, nei pressi di C, un punto dove la ricezione GPS sia la migliore possibile nel contesto locale.

La marcatura del punto di campionamento materializzato nella seconda fase avviene in maniera tale da rendere possibile il reperimento del punto nella terza fase inventariale in modo assolutamente preciso (cioè con errore pari a zero) ma anche nel modo più rapido, e quindi meno costoso, possibile.

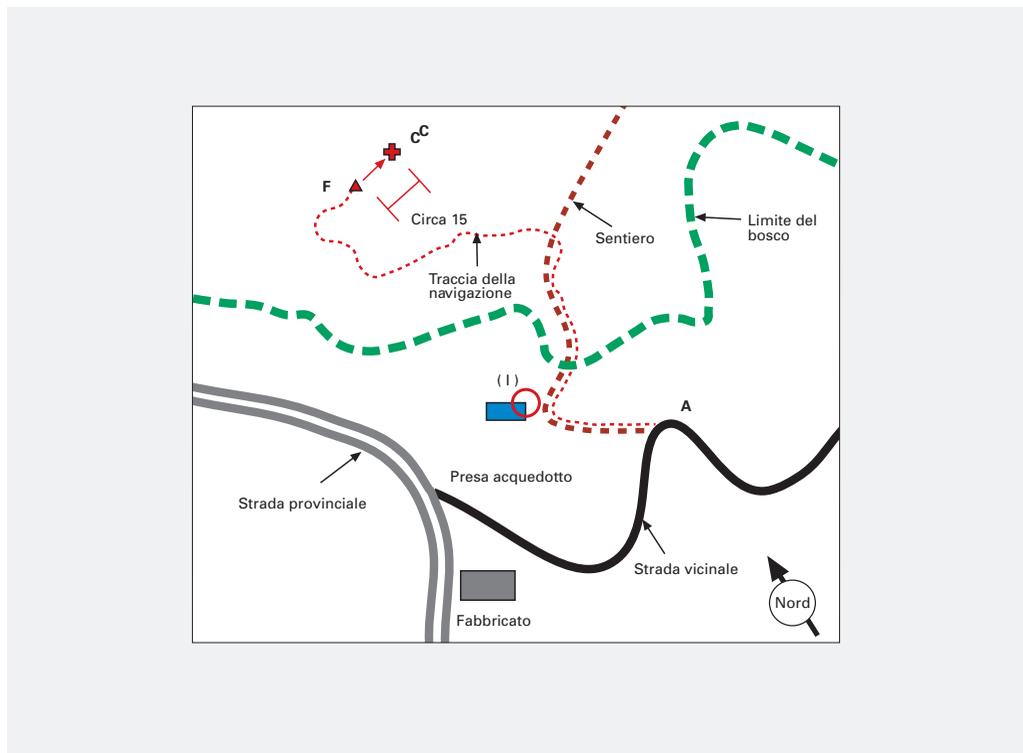


Figura 7.7 Schema della procedura di navigazione assistita da GPS, dal generico punto di accesso A al punto di campionamento C, passando dai punti di inizio (I) e fine (F) navigazione.

Il ritrovamento in terza fase si avvale sempre della navigazione GPS, di metal detector e dell'ausilio di tutte le indicazioni per il raggiungimento del punto registrate durante la seconda fase (descrizioni testuali, schizzi grafici, documentazione fotografica), nonché delle marcature sul terreno. L'avvicinamento avviene impostando come coordinate-obiettivo quelle del punto F rilevate in seconda fase. Una volta raggiunto F, viene individuato il picchetto interrato di F con il metal detector. Da tale picchetto si riportano sul terreno i dati di offset (distanza e azimuth rilevati nella seconda fase) di C da F raggiungendo così un intorno molto ristretto di C, il cui picchetto viene ritrovato nuovamente con il metal detector. Trovato il picchetto di C, viene sostituito il picchetto provvisorio con quello permanente.

Per la raccolta e l'organizzazione dei dati vengono utilizzati i computer palmari associati agli strumenti di controllo del ricevitore GPS. Il rilevatore si avvale di apposite procedure informatiche (INFOR2, NAV3, RAS3) che gli propongono la sequenza di informazioni da raccogliere e le modalità di archiviazione (scelta di alternative da menù, digitazione di brevi testi con tastiera virtuale, realizzazione di schizzi digitali con penna ottica, registrazione di note vocali con un registratore integrato) (Fig. 7.8).

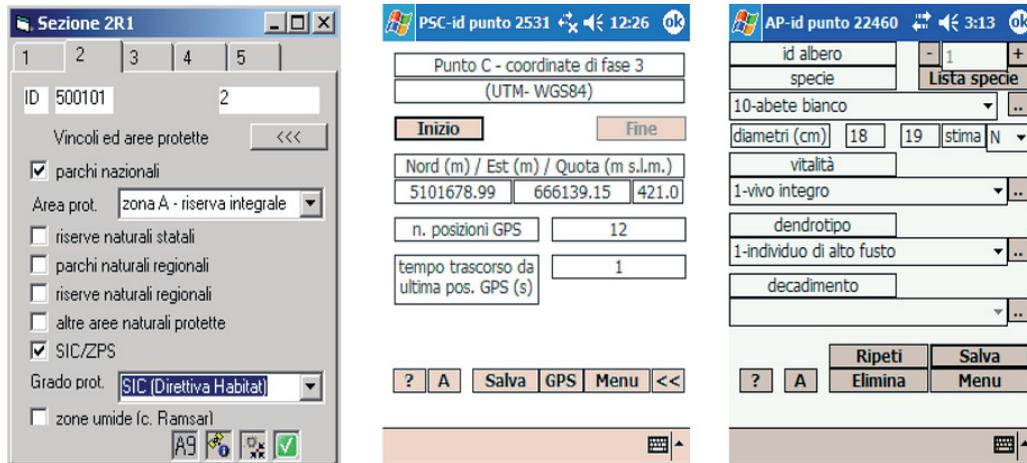


Figura 7.8 Esempi di interfaccia dei software di campagna (su computer palmare). INFOR2 (a sinistra), NAV3 (al centro), RAS3 (a destra).

Rientrata presso la sede di servizio, la squadra di rilievo procede al trasferimento dei dati di campagna su un normale computer portatile, ad una revisione della congruità delle informazioni raccolte e ad eventuali correzioni. Successivamente, attraverso collegamenti telefonici su reti dedicate, viene istituita una connessione tra il computer portatile e l'Archivio centrale e viene trasferito a quest'ultimo il contenuto informatico aggiornato di tutti i punti INFC di pertinenza della squadra stessa. In tal modo i dati rilevati vengono raccolti per le elaborazioni successive (punti a rilievo ultimato) e, temporaneamente, vengono registrati anche dati incompleti (punti "in lavorazione") per salvarli da eventuali danneggiamenti. Presso l'archivio centrale vengono compiute infine ulteriori verifiche e si procede alla validazione definitiva delle informazioni acquisite.

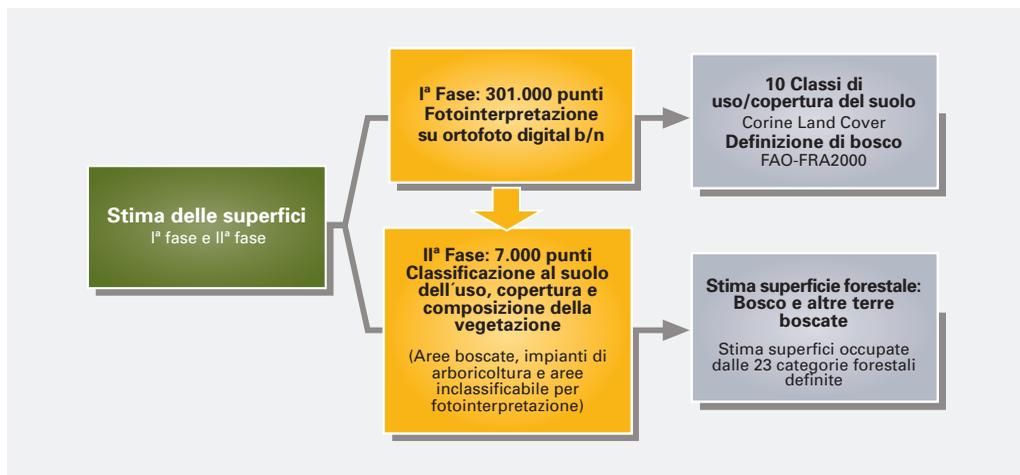


Figura 7.9 Schema sinottico delle procedure di navigazione e posizionamento dei punti inventariali.

7.4 Le prime due fasi campionarie e la stima delle superfici

Uno dei principali obiettivi dell'INFC è la stima della superficie occupata dalle foreste e dalle altre terre boscate e dalle loro ripartizioni nei diversi tipi di soprassuolo.

A tale scopo è necessario individuare un opportuno sistema di classificazione e delineare una procedura chiara per l'attribuzione delle unità campionarie. Le classificazioni adottate devono essere inoltre il più possibile coerenti con gli standard fissati a livello internazionale.

Il livello di dettaglio della classificazione e la definizione delle classi dipendono anche dalle modalità scelte per il rilevamento dei punti campione. Nella prima fase, che prevede un rilevamento dei punti inventariali mediante fotointerpretazione, allo scopo di mantenere elevata l'accuratezza della classificazione, vengono riconosciute soltanto poche classi principali di uso/copertura del suolo, mentre una classificazione accurata in categorie forestali distinte per la loro composizione specifica è possibile soltanto con il passaggio alla seconda fase, dove è previsto il rilievo al suolo di un nutrito sottocampione dei punti di prima fase (pari a circa un terzo dei punti ricaduti in prima fase nelle aree boscate).

I tratti principali del sistema di classificazione di prima fase consistono nella sua coerenza da un lato con la definizione di bosco adottata a livello internazionale dalla

FAO con FRA 2000, dall'altro nella sua corrispondenza quasi totale con il livello gerarchico più alto della classificazione del CORINE Land Cover. Riguardo alla definizione di bosco, che si basa su soglie critiche dimensionali di estensione (5.000 m²), ampiezza (20 m), altezza (5 m) e grado di copertura delle chiome (10%), il supporto telerilevato utilizzato, consistente nelle ortofoto digitali in bianco e nero (datate fra il 2000 e il 2003), non permette una sua applicazione completa, in particolare per quanto riguarda la valutazione dell'altezza dei soprassuoli e della copertura relativa di alberi e arbusti. Pertanto si è ritenuto necessario adottare una procedura che arrivasse alla stima complessiva della superficie forestale vera e propria soltanto alla fine della seconda fase, basando le stime su di una combinazione fra i risultati di prima e seconda fase.

Al termine della prima fase, il campione di circa 301.000 punti distribuiti sull'intero territorio nazionale è stato perciò assegnato a dieci semplici classi di copertura (parchi urbani, altre superfici artificiali, impianti di arboricoltura, altre superfici agricole, aree boscate – comprendenti il bosco vero e proprio e indistintamente tutte le altre terre boscate - praterie, pascoli e incolti, zone a vegetazione rada o assente, zone umide e corpi d'acqua, oltre alle aree inclassificabili).

Nella seconda fase, il sottocampione di punti visitati al suolo è stato estratto dagli strati relativi alle aree boscate, agli impianti di arboricoltura e alle aree inclassificabili per fotointerpretazione. Questa fase consiste in un rilievo al suolo dei punti estratti allo scopo principale di conseguire la stima della superficie forestale, distinta in bosco e in altre terre boscate (queste ultime caratterizzate secondo la definizione FAO FRA2000 dal non poter raggiungere i 5 m di altezza a maturità o in alternativa da una copertura arborea molto rada, compresa fra il 5 e il 10%), e la stima delle superfici occupate dalle diverse categorie forestali definite. Il sistema di classificazione del tipo di bosco definisce in tutto 23 categorie basate sulla composizione specifica: 17 categorie di bosco, 3 di impianti di arboricoltura da legno, 3 di arbusteti. A queste si aggiungono le aree temporaneamente prive di soprassuolo, ossia quelle aree interessate da tagliate o da eventi di disturbo (incendio, calamità naturali, ecc.) che hanno portato all'assenza temporanea del soprassuolo. Le categorie forestali vengono poi suddivise in 91 sottocategorie di maggiore dettaglio. La classificazione del tipo di vegetazione in categorie e sottocategorie forestali avviene sulla base della specie prevalente in termini di copertura.

Le principali classi del sistema adottato per la classificazione dell'uso e copertura del suolo e del tipo di vegetazione sono elencate in Fig. 7.10.

Nella prima fase la fotointerpretazione è stata condotta da cinquanta fotointerpreti del Corpo Forestale dello Stato (CFS) e delle Regioni e Province autonome. Questi operatori hanno lavorato nei diversi uffici locali connettendosi ad un database centrale che è stato continuamente aggiornato con i risultati della classificazione. Le classi di copertura ed uso del suolo e le relative sottoclassi sono state osservate su ortofoto

7. Inventario Forestale Nazionale (INFC) e ruolo delle piantagioni forestal

Fase I Classi di uso/copertura del suolo	Fase II Categorie inventariali e forestali	
<p>Superfici artificiali Parchi urbani Altre superfici artificiali</p> <p>Superfici agricole Impianti di arboricoltura da legno Altre superfici agricole</p> <p>Superfici boscate e ambienti seminaturali Aree boscate Formazioni forestali Formazioni forestali rade Aree temporaneamente prive di soprassuolo</p> <p>Praterie, pascoli e incolti Aree con vegetazione rada o assente</p> <p>Zone umide</p> <p>Acque</p>	<p>Boschi Boschi bassi Boscaglie Boschi radi</p> <p>Impianti di arboricoltura</p> <p>Arbusteti</p>	<p>Boschi di larice e cembro Boschi di abete rosso Boschi di abete bianco Pinete di pino silvestre e pino montano Pinete di pino nero, pino laricio e loricato Pinete di pini mediterranei Altri boschi di conifere puri e misti Faggete Boschi di rovere, roverella e farnia Boschi di cerro, farnetto, fragno, vallonea Castagneti Ostrieti, carpineti Boschi igrofilii Altri boschi caducifogli Leccete Sugherete Altri boschi di latifoglie sempreverdi</p> <p>Pioppeti artificiali Piantagioni di altre latifoglie Piantagioni di conifere</p> <p>Arbusteti subalpini Arbusteti di clima temperato Macchia, arbusteti mediterranei</p>

Figura 7.10 Classi di uso/copertura del suolo e principali tipi di vegetazione individuati nelle fasi I e II dell'INFC; le classi di I fase circondate dal riquadro sono state campionate in II fase.

digitali ad una scala nominale di 1:10.000 datate in un periodo compreso fra il 2000 ed il 2003. I fotointerpreti hanno utilizzato funzioni GIS implementate in un sistema informativo geografico nazionale (Sistema Informativo della Montagna - SIM), che comprende diversi strati informativi geografici (catasto, DTM) e al quale è possibile accedere tramite connessione Intranet.

Le attività di fotointerpretazione sono state sottoposte a controlli ripetuti da parte dei ricercatori e tecnici del CRA-MPF, allo scopo di rendere omogenea la classificazione sul territorio nazionale e verificare la qualità dei dati raccolti. Per ogni regione sono stati, infatti, riclassificati numerosi punti (da 150 fino a 400) per evidenziare eventuali problemi di interpretazione delle norme di classificazione o disomogeneità nei giudizi tra i diversi fotointerpreti. A conclusione della prima fase è stato realizzato un ulteriore controllo di qualità sul 2% dei punti, scelti casualmente, allo scopo di verificare che gli errori di classificazione fossero contenuti entro i limiti fissati per ciascuna classe; tali limiti sono stati definiti sulla base dell'importanza e della difficoltà di riconoscimento della classe stessa.

Per la seconda fase la raccolta dei dati è stata effettuata da più di cento squadre composte di due-tre rilevatori, formate dal personale del CFS e dei Servizi Forestali delle Regioni a statuto speciale e delle Province autonome.

La seconda fase aveva anche lo scopo di rilevare al suolo informazioni qualitative relative ai soprassuoli forestali e alle loro caratteristiche ecologiche. Per le osservazioni al suolo è stata utilizzata un'area di saggio circolare di 2.000 m² centrata sul punto di campionamento. Altre informazioni di tipo amministrativo, relative alla proprietà, alla presenza di aree protette, a vincoli, ecc., sono state raccolte mediante interviste o consultazioni di banche dati, mentre le ortofoto digitali sono state usate per rilevare il grado di copertura delle chiome, la tessitura (distribuzione orizzontale nello spazio) e i margini delle foreste. Per ciascun punto, sono stati rilevati circa trenta attributi qualitativi, oltre ai dati necessari per il posizionamento spaziale. L'elenco degli attributi qualitativi rilevati nell'inventario, con le relative fonti di informazione, viene presentato in Tab. 7.1.

Le estensioni di territorio regionale e nazionale interessato dalle diverse classi e categorie di copertura forestale sono state stimate sulla base della numerosità dei vari sottoinsiemi di punti di sondaggio di seconda fase e di quelle delle classi di provenienza di prima fase. Analogamente è stata stimata la loro ripartizione secondo le modalità di articolazione degli attributi qualitativi osservati. A titolo di esempio, nella Tab. 7.2 sono riassunte

Aree tematiche	Fonti	Attributi	Fase
Uso e copertura	Fotointerpretazione	Classe di uso/copertura del suolo	I
Classificazione della vegetazione	Rilievi in campo	Categoria inventariale, categoria e sottocategoria forestale	II
Informazioni generali	Rilievi in campo, interviste, leggi e regolamenti, GIS	Proprietà, aree protette e vincoli, tipo di gestione, fruibilità turistico-ricreativa	II
Dati stazionali	Rilievi in campo	Esposizione, pendenza, giacitura, possibilità di prelievo legnoso, presenza di fenomeni di dissesto	II
Descrizione del	Rilievi in campo	Struttura, stadio di sviluppo, composizione in conifere, latifoglie e soprassuolo misto, naturalità, presenza di microhabitat e infrastrutture artificiali	II
Viabilità	Rilievi in campo, cartografia	Distanza da strade camionabili, strade forestali, piste, sentieri, tempo necessario per l'accesso a piedi	II
Grado di copertura, struttura spaziale	Fotointerpretazione	Grado di copertura, struttura orizzontale (tessitura), margini	II
Stato di salute	Rilievi in campo	Presenza di danni su oltre 1/3 del soprassuolo e causa del danno	II*

Tabella 7.1 Elenco degli attributi qualitativi rilevati in I e II fase INFC distinti per area tematica e per fonte delle informazioni.

7. Inventario Forestale Nazionale (INFC) e ruolo delle piantagioni forestal

le stime di superficie delle due principali categorie di aree boscate secondo FRA2000, il Bosco e le Altre terre boscate, ai diversi livelli amministrativi e territoriali previsti (Regioni, macroaree e intero territorio nazionale). Come si può vedere, tutte le stime di estensione prodotte sono accompagnate da una stima dell'incertezza campionaria espressa in termini di coefficiente di variazione percentuale.

Distretto	Bosco		Altre terre boscate		Superficie forestale totale		Superficie e territoriale (ettari)
	superficie (ettari)	ES (%)	superficie (ettari)	ES (%)	superficie (ettari)	ES (%)	
Piemonte	870 594	1.1	69 522	7.2	940 116	1.0	2 539 983
Valle d'Aosta	98 439	3.1	7 489	21.4	105 928	2.7	326 322
Lombardia	606 045	1.4	59 657	8.2	665 703	1.2	2 386 285
Alto Adige	336 689	1.6	35 485	9.9	372 174	1.3	739 997
Trentino	375 402	1.4	32 129	10.3	407 531	1.1	620 690
Veneto	397 889	1.7	48 967	8.3	446 856	1.4	1 839 122
Friuli V.G.	323 832	1.7	33 392	9.9	357 224	1.3	785 648
Liguria	339 107	1.5	36 027	9.5	375 134	1.1	542 024
Regioni dell'arco alpino	3 347 995	0.5	322 668	3.3	3 670 664	0.4	9 780 071
Emilia Romagna	563 263	1.4	45 555	8.5	608 818	1.2	2 212 309
Toscana	1 015 728	1.0	135 811	4.9	1 151 539	0.7	2 299 018
Umbria	371 574	1.4	18 681	13.4	390 255	1.2	845 604
Marche	291 394	1.8	16 682	12.8	308 076	1.6	969 406
Lazio	543 884	1.4	61 974	7.3	605 859	1.2	1 720 768
Abruzzo	391 492	1.5	47 099	7.6	438 590	1.3	1 079 512
Regioni dell'Appennino centrale	3 177 335	0.6	325 801	3.1	3 503 136	0.5	9 126 617
Molise	132 562	2.9	16 079	14.2	148 641	2.3	443 765
Campania	384 395	1.9	60 879	7.3	445 274	1.5	1 359 025
Puglia	145 889	3.4	33 151	10.0	179 040	2.6	1 936 580
Basilicata	263 098	2.4	93 329	5.6	356 426	1.5	999 461
Calabria	468 151	1.8	144 781	4.6	612 931	1.1	1 508 055
Sicilia	256 303	2.7	81 868	6.2	338 171	1.9	2 570 282
Sardegna	583 472	2.0	629 778	1.8	1 213 250	0.8	2 408 989
Regioni dell'Appennino meridionale e Isole	2 233 870	0.9	1 059 863	1.5	3 293 733	0.5	11 226 157
Italia	8 759 200	0.4	1 708 333	1.3	10 467 533	0.3	30 132 845

Tabella 7.2 Estensione delle macrocategorie inventariali Bosco e Altre terre boscate, secondo FRA2000, per Regioni e Province Autonome, per macroaree e per l'intero territorio italiano.

Tabelle con simile struttura sono state prodotte per presentare le stime di estensione relative alle diverse articolazioni della superficie forestale, per tipo di bosco, per carattere qualitativo osservato, per diverso livello territoriale e per i vari loro possibili incroci. Dette tabelle, raccolte in quattro documenti costituiti complessivamente da quasi 1400 pagine, possono essere agevolmente consultate sul sito dell'inventario forestale nazionale (www.infc.it).

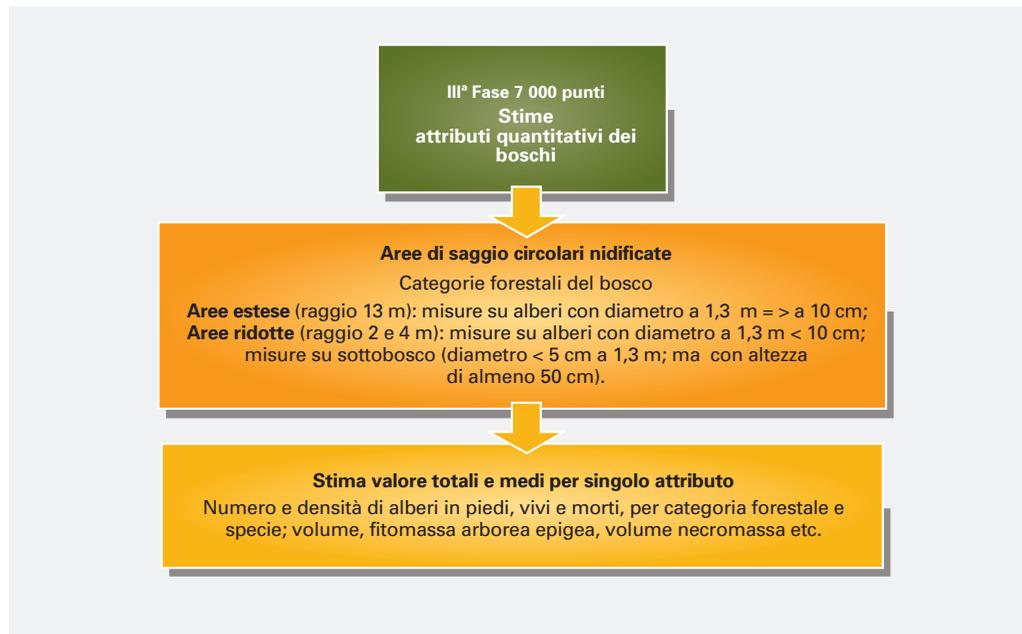


Figura 7.11 Schema sinottico delle procedure di stima delle superfici di campionamento.

7.5 La terza fase campionaria e le stime relative ai vari attributi quantitativi dei boschi

Come già indicato, alla raccolta degli attributi quantitativi dei soprassuoli forestali è dedicata quasi interamente la terza fase dell'INFC. I rilievi vengono eseguiti all'interno di aree di saggio circolari tra loro nidificate, centrate sul punto di campionamento, con la configurazione illustrata in Fig. 7.12. Le informazioni raccolte permettono la stima dei valori totali e medi di strato per ogni singolo attributo nelle diverse categorie

7. Inventario Forestale Nazionale (INFC) e ruolo delle piantagioni forestali

forestali, nonché la loro ripartizione per specie di appartenenza e classe dimensionale. In ciascuno dei punti inventariali di terza fase vengono effettuate misurazioni di attributi e ordinamenti per modalità di caratteri oggetto solo di osservazione; si è esclusa a priori l'esecuzione di campionamenti di tipo distruttivo per gli elevati tempi di rilevamento e gli elevati costi di osservazione in laboratorio.

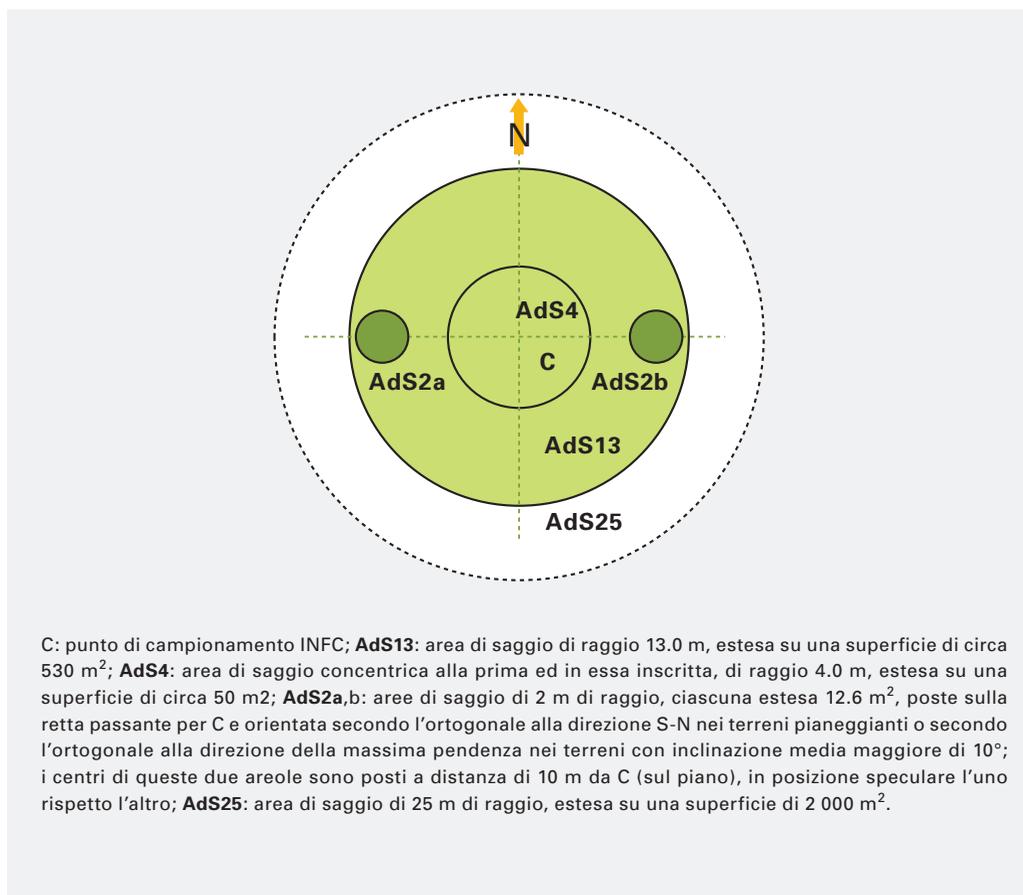


Figura 7.12 Configurazione delle unità di campionamento di terza fase, con l'orientamento previsto nel caso di punti di sondaggio su terreni pianeggianti.

Le dimensioni delle aree di saggio sono funzionali alla grandezza e alla numerosità degli oggetti da campionare, ma tengono anche conto di una valutazione dei tempi richiesti per le misure dendrometriche, cosicché sono adottate aree più estese per soggetti di grandi dimensioni (con bassa densità attesa) e aree ridotte per soggetti di piccole dimensioni (con alta densità attesa). Nello specifico gli alberi oltre la soglia di cavallettamento (5 cm a 1,3 m da terra) ma aventi diametro a 1,3 m inferiore a 10 cm vengono rilevati solo se presenti entro aree di saggio di 4 m di raggio, quelli con diametro uguale o maggiore a 10 cm in aree di saggio di 13 m di raggio e il sottobosco (inteso come tutta la vegetazione di consistenza legnosa che non supera la soglia diametrica di 5 cm a 1,3 m ma presenta un'altezza di almeno 50 cm) in due areole piccole, con raggio pari a 2 m.

Le misure indicate per il raggio delle aree di saggio si riferiscono sempre al piano orizzontale, cosicché nel caso di aree di saggio su terreno inclinato la figura che materialmente si delimita è una ellisse, derivata dalla proiezione del cerchio sul piano inclinato, con l'asse maggiore orientato secondo la linea di massima pendenza. L'uso di moderna strumentazione, come ad es. il distanziometro/ipsometro Vertex, consente di tracciare agevolmente e con una certa velocità il perimetro dell'area o di controllare l'inclusione/esclusione delle piante di bordo.

I principali elementi oggetto di rilevazione sono gli alberi in piedi, vivi e morti. Questi vengono classificati secondo la specie botanica, il dendrotipo, la vitalità e l'integrità e se ne rilevano al contempo alcune grandezze, come il diametro a 1,3 m e l'altezza nel caso di alberi troncati. A tale proposito si precisa che anche i soggetti appartenenti a specie arbustive, purché di dimensioni superiori alla citata soglia minima, sono oggetto degli stessi tipi di rilievo, ma non possono mai transitare nel set di alberi campione delle osservazioni ipso-auxometriche.

Questi ultimi, nominalmente dieci per ogni area di saggio, costituiscono un sottocampione dell'insieme di alberi nell'area di saggio con raggio 13 m e vengono selezionati secondo un criterio di casualità e di rappresentatività tra quelli sani ed integri. Tra i parametri misurati spiccano l'altezza dendrometrica e l'incremento periodico degli ultimi 5 anni, che consentiranno di costruire modelli regressivi per ciascuno strato di popolazione (ad esempio per una specie o un gruppo di specie in una determinata categoria forestale) e, in definitiva, di ricavare una stima del volume e della fitomassa epigea presente, nonché del suo incremento futuro. A tal fine sono state prodotte dal CRA-MPF apposite funzioni di stima della fitomassa di ciascuna specie (o gruppo) con valenza nazionale.

Nelle stesse aree di saggio vengono effettuati rilievi anche su tutto il legno morto a terra presente, ma limitatamente al materiale che raggiunge i 10 cm di diametro nella sezione minima. Si è preferito tale approccio, anziché la tecnica del campionamento lineare usata talvolta per questo tipo di oggetti distribuiti casualmente sul terreno, come è il caso dei residui di utilizzazione abbandonati o di fusti e alberi schiantati (coarse woody

7. Inventario Forestale Nazionale (INFC) e ruolo delle piantagioni forestal

debris), anche in relazione alla speditezza dei lavori di campagna, poiché, di fatto, le squadre possono trarre vantaggio dalla già avvenuta perimetrazione dell'area di saggio. Il protocollo delle operazioni in campo prevede la misura di diametri e lunghezze da impiegare per le successive determinazioni volumetriche.

Sulla base di attività sperimentali in corso, verranno definite le relazioni da adottare per le stime di fitomassa e contenuto di carbonio delle componenti morte, distintamente per le conifere e le latifoglie, anche in funzione dello stato di decomposizione. Quest'ultimo attributo viene rilevato anche sui soggetti secchi in piedi.

Alla rinnovazione e agli arbusti del sottobosco è dedicato uno specifico protocollo di rilevamento, che consente di valutare per ciascuna specie, la densità (ripartita in numero di individui per classe dimensionale) e lo stato fitosanitario.

Delle ceppaie presenti vengono misurate l'altezza e il diametro alla sezione di taglio, ma viene anche stimata l'epoca di taglio, con l'unico obiettivo di distinguere gli interventi effettuati negli ultimi dodici mesi da quelli precedenti. Tali informazioni si rivelano utili, da una parte nella stima della massa asportata con il taglio (impiegando appropriate relazioni e modelli), dall'altra nella valutazione di una componente della fitomassa legnosa che resta in bosco dopo le utilizzazioni. Anche per questo oggetto di osservazione, in analogia con quanto fatto per il legno morto, si procede alla determinazione dello stato di decomposizione e della specie botanica di appartenenza della ceppaia.

Un particolare protocollo, basato sui sintomi macroscopici di patologie e danni sulla sola componente arborea, viene seguito per consentire la classificazione dei principali agenti causali delle avversità di origine biotica. L'indagine consiste in una valutazione generale delle condizioni del popolamento, approfondita mediante un'analisi di dettaglio su pochi soggetti campione solo nei casi più problematici.

Infine, ad integrazione di quelle già acquisite in seconda fase, vengono raccolte alcune informazioni di tipo qualitativo, così da approfondire aspetti sull'ordinamento selvicolturale e sulla gestione del popolamento: pratiche colturali in corso, modalità di utilizzazione e di esbosco, produzioni secondarie (legnose e non), funzioni prioritarie associabili.

La raccolta delle informazioni di terza fase ha interessato la parte di superficie forestale che soddisfa la definizione di Bosco della FAO, integralmente adottata dall'inventario forestale italiano: si tratta delle categorie dei Boschi alti, degli Impianti di arboricoltura da legno e delle Aree temporaneamente prive di soprassuolo, così come definite nel primo rapporto sulle stime di superficie. Le Altre terre boscate, che costituiscono circa il 17% della superficie forestale totale, non sono state invece interessate dalle misurazioni di terza fase.

Per la determinazione di alcuni attributi di terza fase non direttamente rilevabili sul terreno, quali ad esempio il volume degli alberi in piedi, la loro fitomassa e l'incremento

corrente di volume, o la cui misurazione su tutti gli alberi presenti nelle unità di campionamento sarebbe risultata particolarmente onerosa, sono state impiegate idonee equazioni di previsione.

Un primo gruppo di modelli previsionali è stato appositamente costruito per la stima dell'altezza dendrometrica degli alberi in piedi. Articolati per specie o per gruppo di specie, questi modelli sono stati calibrati impiegando le informazioni raccolte con gli alberi campione delle stesse aree di saggio inventariali. Essi prevedono la stima dell'altezza degli alberi in funzione del corrispondente diametro a 1,3 m dal suolo e dell'altezza dominante del popolamento su cui insiste l'unità campionaria. A tal fine sono state impiegate informazioni ipso-diametriche relative a oltre 45000 alberi e a circa 6600 aree di saggio.

Per la stima del volume commerciale degli alberi in piedi e della loro fitomassa epigea, sia totale sia ripartita nelle diverse componenti arboree, sono stati impiegati i modelli predisposti nell'ambito di un ampio progetto nazionale di ricerca sullo stato e sulla gestione delle risorse forestali italiane (Riselvitalia). Si tratta di 25 gruppi di equazioni di previsione, articolati per specie o gruppi di specie, per la taratura dei quali sono state impiegate le informazioni relative a quasi 1.300 alberi campione raccolti in varie parti del territorio italiano.

Infine, per le aree di saggio con informazioni inventariali insufficienti ad una stima diretta dell'incremento corrente del volume degli alberi vivi, sono stati approntati modelli di previsione dell'incremento corrente ad ettaro del soprassuolo in funzione del corrispondente volume ad ettaro e dell'altezza dominante. Per ogni categoria forestale, sono stati così calibrate due equazioni di previsione, delle quali la prima fornisce la stima dell'incremento corrente di volume in funzione del solo volume unitario e la seconda invece in funzione sia del volume sia dell'altezza dominante, da impiegare alternativamente in funzione delle informazioni effettivamente disponibili. Per la calibrazione dei modelli sono state impiegate le informazioni relative alle oltre 5.700 aree di saggio dotate di dati sufficienti per una stima accurata delle grandezze coinvolte nei modelli.

I dettagli dei procedimenti seguiti nella elaborazione dei dati raccolti in campagna per la formulazione delle stime finali delle varie grandezze di interesse statistico sono illustrati nel documento di presentazione dei risultati di terza fase disponibile sul sito web dedicato all'inventario forestale nazionale sopra segnalato. A titolo di esempio, nella Tab. 7.3 sono riassunte le stime relative al volume commerciale degli alberi vivi, alla fitomassa totale epigea degli stessi, al volume della necromassa di medie e grandi dimensioni e all'incremento corrente di volume degli alberi vivi, calcolate per le singole regioni, per gruppi di regioni attigue (macroaree) e per l'intero territorio nazionale. Ai valori totali delle grandezze stimate è stato associato anche il valore della relativa incertezza statistica.

7. Inventario Forestale Nazionale (INFC) e ruolo delle piantagioni forestal

Distretto territoriale	Volume del fusto e dei rami grossi	ES	Fitomassa arborea epigea	ES	Volume della necromassa	ES	Incremento corrente di volume	ES
	(m3)	(%)	(Mg)	(%)	(m3)	(%)	(m3)	(%)
Piemonte	129 776 430	3.0	87 549 924	2.9	13 245 203	6.7	3 965 982	3.2
Valle d'Aosta	15 334 302	7.6	8 576 939	7.1	1 075 773	20	298 242	8.0
Lombardia	108 036 723	4.1	68 464 944	3.8	7 981 881	7.8	3 143 506	4.0
Alto Adige	105 188 527	4.6	55 213 115	4.4	4 451 482	6.5	1 856 437	4.3
Trentino	105 776 549	4.7	59 062 534	4.3	5 104 413	7.3	2 301 685	4.2
Veneto	81 195 960	4.6	51 049 296	4.2	4 665 297	7.2	2 210 914	4.1
Friuli V.G.	67 830 001	5.3	45 655 448	5.0	3 874 985	8.4	1 821 997	4.7
Liguria	49 438 791	4.5	34 695 419	4.3	6 203 651	7.4	1 576 441	4.9
Regioni dell Arco alpino	662 577 283	1.6	410 267 619	1.5	46 602 686	2.9	17 175 204	1.5
Emilia Romagna	72 338 122	3.9	55 589 418	3.7	4 962 910	7.4	2 484 463	3.9
Toscana	131 955 985	3.1	97 118 033	2.9	11 563 432	7.2	4 154 946	3.4
Umbria	29 254 669	4.8	24 793 823	4.6	1 025 374	14.2	814 265	4.8
Marche	24 293 622	6.6	19 746 332	6.1	937 414	13.1	789 922	7.2
Lazio	57 510 635	4.6	46 010 483	4.5	2 101 379	10.3	1 548 091	4.8
Abruzzo	50 492 831	4.6	40 059 450	4.5	1 530 966	10	1 316 967	4.8
Regioni dell Appennino centrale	365 845 864	1.8	283 317 539	1.7	22 121 475	4.4	11 108 654	1.9
Molise	14 635 984	8.9	11 793 710	8.8	568 606	18.5	422 162	7.5
Campania	42 502 693	6.0	33 350 902	6.0	1 301 030	12.8	1 566 083	5.4
Puglia	12 160 485	10.9	9 370 738	10.6	271 161	17.5	407 879	8.8
Basilicata	27 661206	6.9	21 788 324	6.9	560 390	14	738 870	6.0
Calabria	87 967 454	4.7	58 367 627	4.9	3 274 950	10.2	2 524 411	4.7
Sicilia	23 182 797	6.7	16 768 781	6.3	821 091	12.2	756 005	7.1
Sardegna	32 882 733	5.6	29 417 858	5.7	976 544	12.7	1 173 026	5.5
Regioni dell Appennino meridionale e Isole	240 993 352	2.5	180 857 940	2.5	7 773 772	5.5	7 588 436	2.4
Italia	1 269 416 499	1.1	874 443096	1.0	76 497 933	2.3	35 872 293	1.1

Tabella 7.3 Stime del valore totale e della relativa incertezza campionaria per alcuni principali attributi della superficie a Bosco, per Regioni e Province Autonome, per macroaree e per l'intero territorio nazionale.

Con i dati raccolti in terza fase, oltre agli attributi appena presentati sono calcolate e fornite - per le aree occupate dal Bosco - anche stime del numero degli alberi con diametro minimo uguale o superiore a 4,5 cm, dell'area basimetrica, della fitomassa delle varie componenti arboree (fusto e rami grossi, ramaglia, ceppaia), del numero e del volume degli alberi morti in piedi, del volume della necromassa grossolana a terra e del volume delle ceppaie residue. Sono fornite inoltre stime del numero di soggetti di piccole e piccolissime dimensioni (con altezza superiore a 50 cm e diametro a 1,3 m inferiore a 4,5 cm) relativi alle specie arboree. Ovviamente tutte le stime sono prodotte anche per i vari livelli di disaggregazione della superficie boscata, che sono le categorie

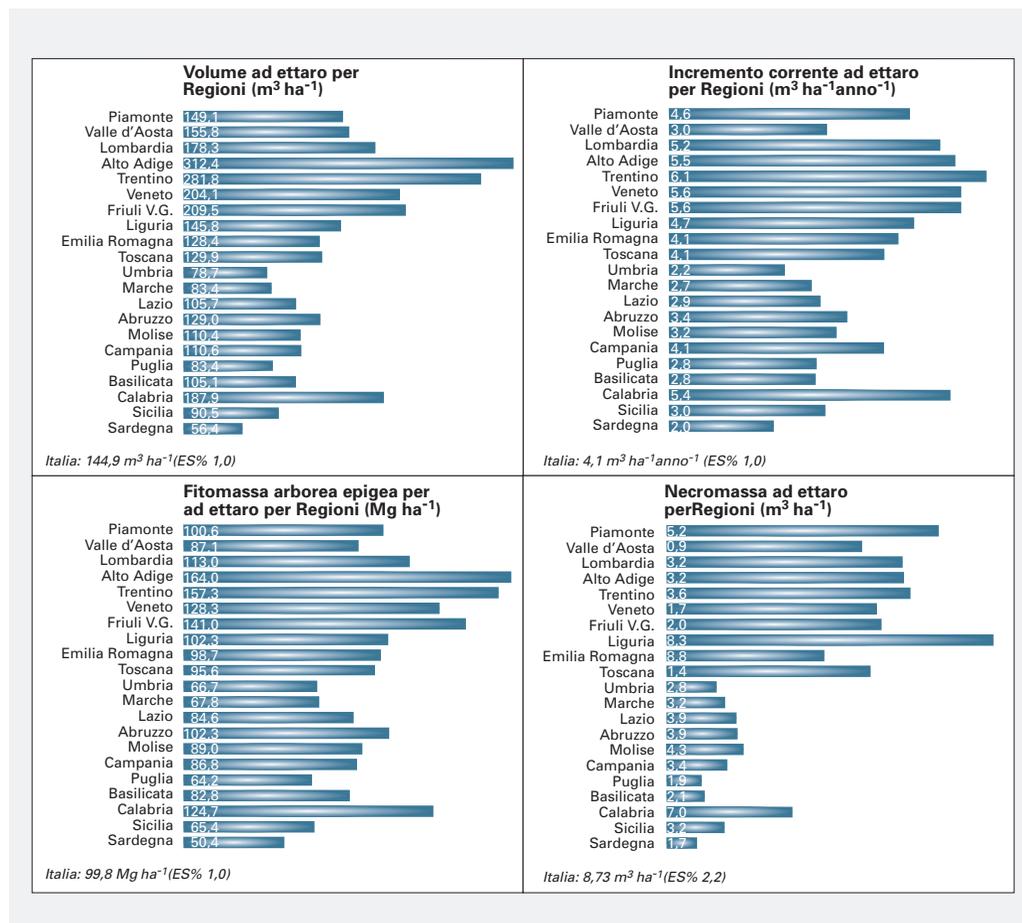


Figura 7.13 Esempi di attributi inventariali stimati per singole Regioni e Province Autonome.

inventariali (boschi alti, impianti di arboricoltura da legno, aree temporaneamente prive di soprassuolo) e tutte le categorie forestali (boschi di larice e cembro, boschi di abete rosso, boschi di abete bianco, ecc.)

Con le informazioni riassunte nella Tab. 7.3 è possibile stimare la quantità di carbonio stoccato nella parte arborea epigea delle aree boscate, che risulta essere pari a circa 437 milioni di tonnellate, con un'incertezza campionaria di $\pm 1\%$, su una superficie boscata di 8.759.200 ettari. La terza fase di campionamento inventariale permette di giungere a determinazioni relative ad uno solo dei serbatoi forestali previsti dagli accordi internazionali. Con le informazioni che saranno raccolte con la terza fase integrativa in corso di svolgimento (fase III+), sarà possibile acquisire i dati necessari per stimare il contenuto di carbonio anche per altri serbatoi forestali, quali ad esempio la necromassa grossolana e fine, la lettiera e il suolo.

7.6 La divulgazione e l'impiego dei risultati inventariali

I risultati dell'indagine inventariale sono stati messi a disposizione dei potenziali utilizzatori con gradualità, mano a mano che le stime venivano prodotte. Nel 2007 sono state pubblicate le principali stime di superficie e nel corso del 2008 i risultati più importanti relativi agli attributi qualitativi. Il principale mezzo di diffusione dei risultati INFC è il sito istituzionale dell'inventario www.infc.it (homepage in Fig. 7.13) dove l'utente può trovare testi sintetici che descrivono il progetto inventariale e le sue diverse fasi di realizzazione e due aree dedicate alla consultazione e al download delle tabelle dei risultati in formato PDF (Portable Document Format) e MS Excel. I risultati principali sono stati riuniti in due report, il primo contenente le stime di superficie (INFC, 2007 per la prima parte e INFC, 2008a per la seconda parte) ed il secondo le stime degli attributi quantitativi (INFC, 2008d), anche questi disponibili sul sito per il download. Un'ulteriore sezione del sito è dedicata alla pubblicazione di alcune rappresentazioni cartografiche della distribuzione dei punti di sondaggio e dei relativi caratteri (Fig.7.14).

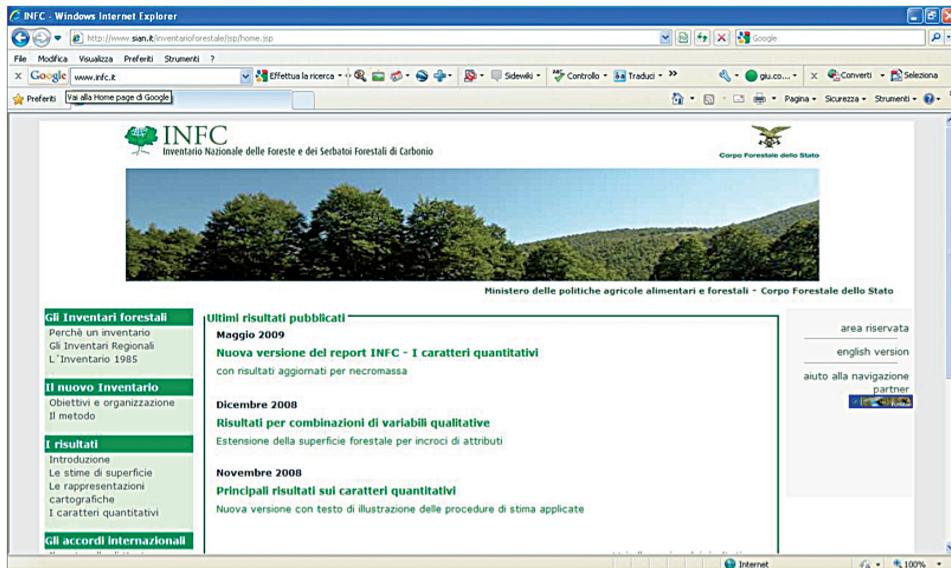


Figura 7.14 Homepage del sito istituzionale dell'inventario forestale nazionale www.infc.it.



Figura 7.15 Betuleti e pinete sulle pendici laviche dell'Etna.

7. Inventario Forestale Nazionale (INFC) e ruolo delle piantagioni forestal

Per rispondere alla domanda informativa ampia e variegata che riguarda i dati dell'inventario forestale nazionale il CRA-MPF sta sviluppando un sistema di ricerca, consultazione e trasferimento di dati e informazioni inventariali via Internet rivolto anche ad utenti meno esperti della materia e che consenta di creare interrogazioni personalizzate sulla base delle proprie esigenze informative. I risultati della ricerca, che avviene attraverso un'interfaccia che guida l'utente nella scelta dell'ambito territoriale e delle variabili, possono poi essere scaricati in forma di dati già organizzati in tabelle ed in formati compatibili con i più comuni software per fogli di calcolo (*MS Excel*, *OpenOffice Calc*) oppure in formati di testo adatti alla condivisione mediante lo *standard PDF*. Il sistema consente anche una ricerca libera, per parole chiave, e propone rappresentazioni grafiche dei risultati selezionati dall'utente in forma di istogrammi. L'intero pacchetto applicativo è stato sviluppato con *Free and Open Source Software* ed è disponibile alla copia, alla modifica e alla redistribuzione sotto licenza *GPL (General Public License)*.

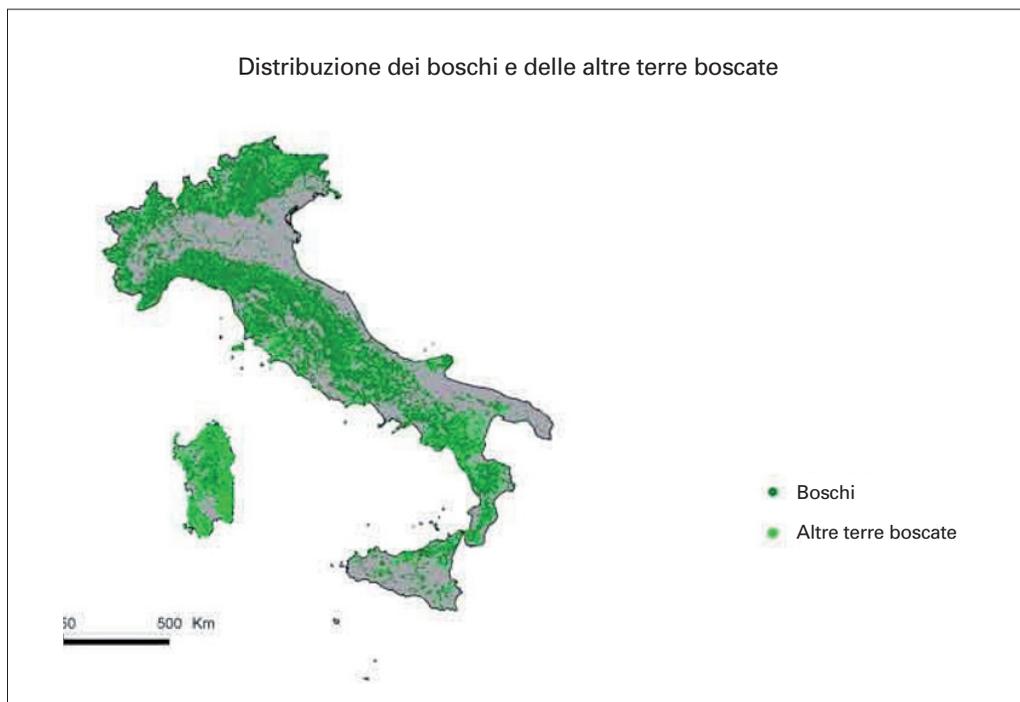


Figura 7.16 Esempio di rappresentazione cartografica dei risultati dell'inventario forestale nazionale.

Dal momento in cui l'INFC ha iniziato a produrre dati aggiornati sulle foreste italiane, le stime prodotte sono state utilizzate come statistiche ufficiali per rispondere alle numerose esigenze generate da processi e accordi internazionali. I primi risultati dell'inventario sui caratteri qualitativi dei boschi sono serviti alla preparazione del terzo report per la Conferenza Ministeriale sulla Protezione delle Foreste in Europa (MCPFE, 2007), mentre è in corso la compilazione del *Forest Resources Assessment 2010* (FRA2010) per la FAO che si basa in gran parte sui risultati dell'INFC relativi all'estensione delle foreste, alla sua ripartizione per specie, all'entità del volume legnoso, della corrispondente massa in termini di peso secco. La disponibilità di dati aggiornati al 2005, anno di riferimento dei risultati INFC, ha consentito di ricostruire per interpolazione con i risultati del precedente inventario, risalente al 1985, la serie storica richiesta dalla FAO e necessaria a descrivere il *trend* di variazione delle superfici forestali e del growing stock per il periodo 1990-2010. I risultati dell'inventario forestale nazionale, in particolare quelli dei rilievi integrativi sui suoli e la necromassa attualmente in corso, costituiranno inoltre la base per la rendicontazione prevista per la Convenzione sui Cambiamenti Climatici e per il Protocollo di Kyoto per le parti relative ai serbatoi forestali per il periodo di impegno 2008-2012.



Figura 7.17 Rimboschimento di Pino nero in fase di rinaturalizzazione (Monte S. Michele – Toscana)

7. Inventario Forestale Nazionale (INFC) e ruolo delle piantagioni forestal

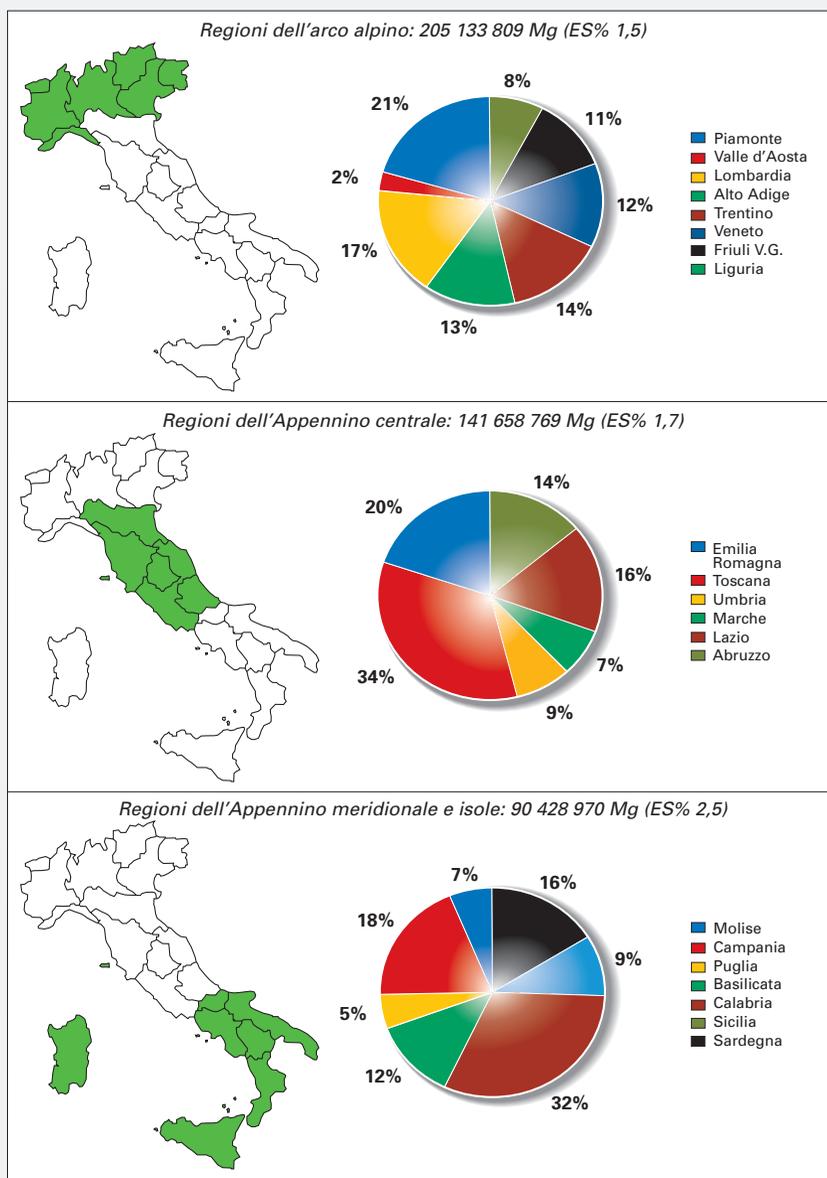


Figura 7.18 Carbonio stoccato nella porzione arborea epigea: contributo delle regioni per macro-aree.

7.7 Il contributo italiano alla mitigazione dei cambiamenti climatici: il ruolo delle piantagioni forestali

Nel corso della COP-7 svoltasi a Marrakesh nel 2001 è stata stabilita la possibilità, da parte dei Paesi che ratificheranno il Protocollo di Kyoto, di contabilizzare i quantitativi di carbonio sequestrati dalle piantagioni forestali realizzate negli anni tra il 1990 ed il 2012. In relazione a ciò, di seguito vengono esposti alcuni dati e formulate alcune considerazioni circa il contributo ai processi di mitigazione dei cambiamenti climatici che potrebbero fornire gli impianti di specie forestali in Italia.

7.7.1 Le piantagioni forestali in Italia

In accordo con il secondo e recente inventario forestale nazionale (INFC, 2005), in Italia gli impianti di specie forestali ricompresi nella categoria inventariale “Impianti di arboricoltura da legno” coprono una superficie di circa 122.000 ha, dei quali oltre la metà (66.000 ha) occupata da pioppeti e la restante parte da latifoglie diverse dal pioppo (41.000 ha) e da conifere (15.000 ha). Secondo altre fonti, gli impianti di latifoglie diverse dal pioppo ammonterebbero a circa 80.000 ha, ripartiti in 40.000 ha di latifoglie con legno di pregio (Pettenella, 2008) ed altrettanti di eucalipti (Gemignani, 2000). Per quanto riguarda le conifere esotiche, alcuni Autori riportano una superficie di circa 20.000 ettari per la douglasia (Mercurio e Minotta, 2000) e di circa 18.000 ettari per il pino insigne (Corona, 2003). A tutt’oggi può inoltre quantizzarsi in circa 6000 ettari l’estensione complessiva dei cedui a corta rotazione realizzati con pioppo, salice e robinia prevalentemente in pianura padana per scopi energetici (Bisoffi *et al.* 2008).

Per quanto riguarda gli impianti realizzati dopo il 1990 e considerati ai fini del Protocollo (le cosiddette Kyoto forests), la loro estensione totale nel decennio 1990-2000 è stata stimata in circa 148.000 ettari ripartiti come indicato in Fig. 7.19.

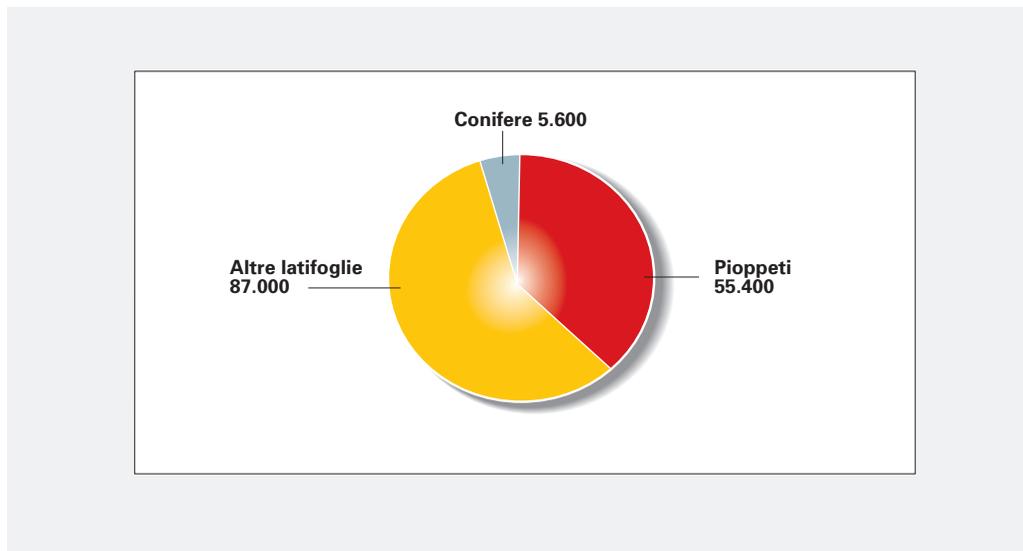


Figura. 7.19 Ripartizione nelle principali tipologie degli impianti forestali realizzati in Italia dal 1990 al 2000; dati in ettari (elaborazione da Anderle *et al.* 2002).

7.7.2 Le piantagioni forestali in Puglia

La stima della capacità di stoccaggio di CO₂ da parte dei boschi può avere rilevanza anche nei contesti territoriali caratterizzati da un patrimonio forestale dimensionalmente ridotto.

È utile comprendere, infatti, quale possa essere il contributo in termini di assorbimento dei gas serra che può essere realizzato da ecosistemi forestali che, seppur di dimensioni ridotte, sono caratterizzati da una più ampia diversificazione tipologica dovuta all'adattamento a condizioni pedoclimatiche limitanti. Quelle appena descritte sono le caratteristiche salienti della regione Puglia. Secondo le statistiche forestali più recenti dell'Inventario Nazionale delle Foreste e dei serbatoi forestali di Carbonio (INFC 2005), la Puglia presenta una superficie forestale di 179.040 ettari pari al 9,2% della superficie complessiva regionale. Il dato pone la regione all'ultimo posto nella classifica delle regioni italiane in materia di boscosità, lontano dalla media nazionale (22%) e del Mezzogiorno (16%). La scarsa consistenza dei boschi risiede soprattutto nella vocazione agricola del territorio legata alla prevalenza di spazi pianeggianti o collinari che hanno favorito l'espansione dell'attività agricola e hanno relegato il patrimonio forestale a lembi sempre più frammentati e marginali.

Seppur di dimensioni ridotte il patrimonio forestale regionale si contraddistingue, però, per la ricchezza di specie arboree ed arbustive. Le condizioni edafiche e climatiche hanno assicurato un buon livello di diversificazione dei boschi e una ricchezza di rilievo sotto il profilo della biodiversità e naturalità. In Puglia sono presenti quasi tutte le differenti tipologie forestali che caratterizzano il territorio nazionale. Particolarmente rilevante, ad esempio, è la presenza delle querce: molte delle specie censite in Italia comprendono nel loro areale di distribuzione il territorio regionale. Altre specie quercine autoctone quali il Fragno (*Quercus trojana* Webb) o la Vallonea (*Quercus macrolepis* Kotsky) rappresentano endemismi tipici e diffusi sul territorio.

Un altro elemento di interesse è rappresentato dalla presenza della macchia mediterranea.

Questa tipologia forestale (oltre 15.000 ettari) rappresenta circa il 2,2% di quella complessiva italiana e pone la Puglia tra le regioni italiane con maggior presenza in termini di superficie complessiva.

Negli ultimi decenni, inoltre, per effetto dell'abbandono colturale di molti terreni agricoli, si sono affermate dinamiche di successione secondaria che hanno determinato un aumento della superficie boschiva regionale. In tal senso il confronto con l'inventario nazionale precedente (IFN 1985) evidenzia un aumento di superficie forestale pari a circa 29.000 ha, nonostante le categorie inventariali e le informazioni che ne derivano non siano perfettamente sovrapponibili. Al fenomeno di espansione, tuttavia, si contrappongono la frequenza e l'intensità con cui il patrimonio boschivo regionale subisce danni per effetto della diffusione degli incendi (soprattutto di origine dolosa) più di quanto avvenga in Italia.

Dalla molteplicità degli aspetti descritti deriva una maggiore articolazione delle variabili e degli aspetti da considerare nelle procedure di stima della capacità di stoccaggio di CO₂ e dei gas-serra.

Bisogna considerare, inoltre, che per il contesto regionale pugliese non si dispone di un adeguato quadro conoscitivo e risultano scarse o incomplete le informazioni di interesse selvicolturale. È carente, infatti, la conoscenza delle caratteristiche ecologiche delle specie presenti, le loro esigenze climatiche ed edafiche, i principali fattori limitanti e i regimi di accrescimento.

Questa carenza informativa suggerisce l'opportunità di approfondire il quadro delle conoscenze, facendo riferimento agli aspetti che, se opportunamente analizzati, possono fornire un dettaglio altrimenti non disponibile. A tal proposito un aspetto che può essere considerato con maggiore interesse è quello relativo all'aumento delle superfici del patrimonio forestale.

Le cause di detto aumento sono da riferirsi principalmente a due elementi:

1. l'affermarsi di dinamiche di ricolonizzazione e di espansione del bosco nei terreni soggetti ad abbandono colturale.

2. la realizzazione di impianti fuori foresta a fini produttivi e naturalistici.

Nel primo caso si tratta di un processo per lo più naturale per il quale talvolta manca la possibilità di definire con certezza i contorni di espansione, per cui si potrebbe collezionare un dato di per sé affetto da errore di stima.

Nel secondo caso la matrice prettamente artificiale degli impianti facilita la procedura di analisi delle superfici.

Prendendo spunto da questa considerazione metodologica, nell'ultimo triennio, dopo una prima indagine di carattere preliminare (Amoruso *et al.* 2005), è stato avviato in Puglia un progetto di ricerca, che si è posto l'obiettivo di realizzare il monitoraggio campionario degli impianti forestali realizzati in recepimento del Regolamento CEE 2080/92.

Come è noto questo regolamento ha istituito un apposito regime comunitario di aiuti per la realizzazione di misure forestali nel settore agricolo, rivolto in primo luogo agli imprenditori agricoli.

La Regione Puglia ha recepito il Reg. 2080/92 attraverso un proprio programma pluriennale d'attuazione ed ha pianificato una campagna di applicazione nel triennio 1994/97. In questo arco temporale sono stati realizzati impianti di imboschimento in terreni ex agricoli e di ampliamento dei boschi in zone ad essi adiacenti. Secondo quanto è possibile desumere dai dati forniti dall'Ispettorato Regionale delle Foreste, a conclusione della campagna risultavano essere stati collaudati e liquidati progetti per complessivi 2.200 ha e migliorati 646 ha di boschi esistenti. Tuttavia gli obiettivi previsti in sede di programmazione preventiva erano stati fortemente disattesi. I fondi messi a disposizione prevedevano un'estensione di 10.000 ha da rimboschire, ma la superficie complessiva degli impianti realizzati era di poco superiore al 20%.

Il progetto di ricerca si è posto l'obiettivo di analizzare i fattori che possono determinare la riuscita degli impianti forestali in termini qualitativi, quantitativi e di sostenibilità ambientale ed economica con particolare riferimento ad un contesto geografico e culturale caratterizzato da una limitata propensione alla realizzazione di piantagioni forestali. Dal punto di vista metodologico l'analisi delle problematiche e delle potenzialità di detti impianti è stata effettuata attraverso l'acquisizione di dati relativi allo stato selvicolturale e fitopatologico. La ricerca è stata articolata in più fasi. All'acquisizione di informazioni sugli impianti (es. verbali di collaudo, cartografie, foto da piattaforma aerea, ecc.) ha fatto seguito una campagna di rilievi in campo sulle condizioni vegetative degli impianti forestali (per una superficie complessiva di 1.570 ha). I dati relativi a consistenza, distribuzione e caratteristiche salienti degli impianti campione distribuiti su tutto il territorio regionale sono stati raccolti, in formato tabellare e cartografico, in una banca dati organizzata secondo una gerarchizzazione amministrativa: Comune-Provincia-Regione (Fig. 7.20).

Il campione di indagine è stato dimensionato su una superficie percentuale pari all'1% (2% nel caso dell'arboricoltura da legno) del 40% della superficie complessiva accertata mediante interpretazione delle ortofoto AIMA.

Le osservazioni condotte in campo su ogni singola pianta hanno riguardato: posizione geografica del singolo albero censito; parametri dendrometrici delle singole piante; stato fitosanitario; pratiche colturali effettuate; descrizione generale dell'area e del tipo di intervento; descrizione dell'ambiente circostante.

Per i rilievi dendrometrici, oltre all'identificazione di ogni albero, è stata annotata la configurazione della chioma (monocaula/policormico) e sono stati misurati il diametro a petto d'uomo, l'altezza totale, l'altezza di inserzione e l'ampiezza della chioma.

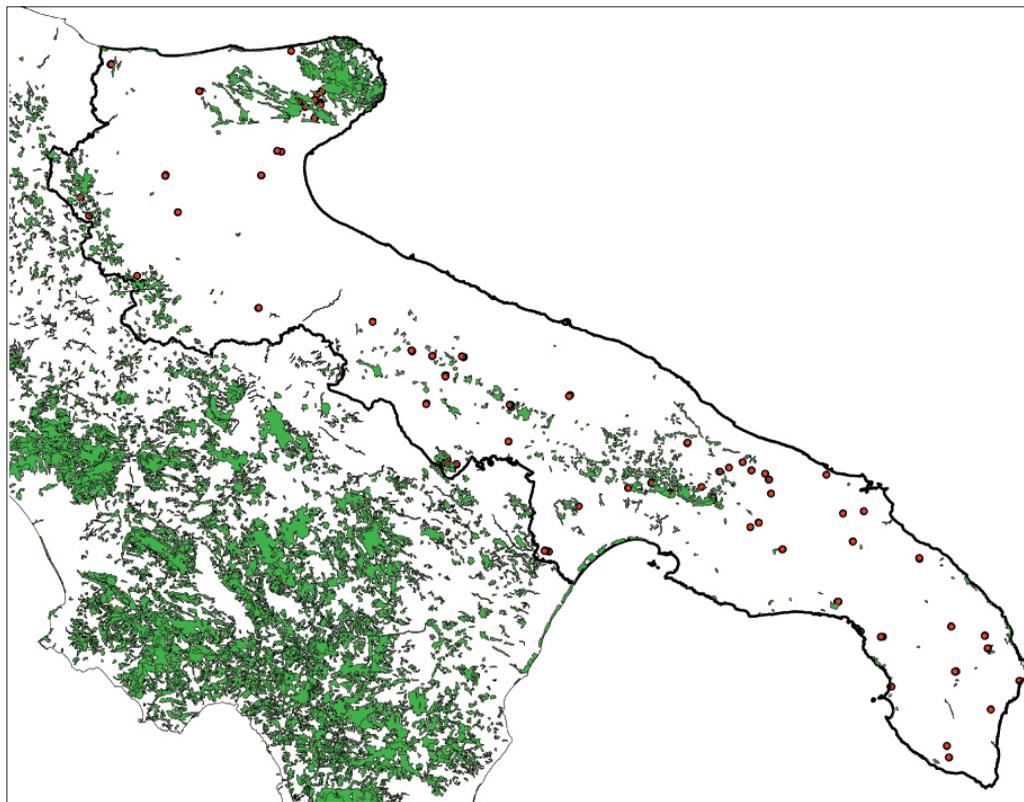


Figura 7.20 Distribuzione del patrimonio forestale della regione Puglia e (in rosso) degli impianti oggetto di rilievo.

Complessivamente sono stati presi in considerazione e studiati 75 impianti forestali distribuiti nell'ambito delle diverse province della regione. Sono stati individuate e censite 7.288 piante rilevando 16 differenti parametri relativi alle caratteristiche dendrometriche, selvicolturali e fitopatologiche.

I risultati dell'indagine mostrano l'esistenza di una serie di fattori che possono interferire con la riuscita degli impianti.

Superfici e tipologie di impianto

La dimensione degli impianti può influire sulla frequenza delle cure colturali e, conseguentemente su rischi e costi della gestione selvicolturale. Impianti di dimensioni contenute presentano migliore qualità e garantiscono un migliore esito anche in ragione di costi di gestione più sostenibili. Dimensioni più grandi richiedono ottimizzazione dei tempi e dei costi degli interventi con conseguente diminuzione del livello qualitativo delle piantagioni. Inoltre, le minori superfici destinate agli impianti attenuano il pericolo di alterazioni significative del paesaggio e l'eccessiva monotonia dei popolamenti così come avveniva, invece, nei rimboschimenti realizzati in epoche precedenti.

Specie impiegate e provenienza del postume di impianto

Nel caso dell'arboricoltura da legno la maggioranza degli impianti è monospecifica, per cui sono state utilizzate noce e ciliegio mai in consociazione con specie accessorie. La scelta prevalente di impianti puri di queste due specie (per le quali in Puglia manca tradizione colturale ed attitudine del territorio regionale) è stata più che altro legata a fattori contingenti, quali la maggiore entità del contributo previsto per l'impianto e la manutenzione, e la massimizzazione, solo teorica, della redditività degli impianti. Molto spesso, l'imprenditore ha potuto verificare che, per mancanza di una necessaria cultura di base, i costi di realizzazione e manutenzione sono andati oltre il beneficio costituito dai contributi. Questa tipologia colturale e, talvolta, le elevate dimensioni degli impianti destano perplessità circa la possibilità di gestione soprattutto dal punto di vista fitosanitario. Non di minore importanza sono i rischi che possono derivare dal rischio di una coltura che fornisca un "monoprodotto". Nei rimboschimenti la scelta limitata delle specie è pratica meno ricorrente. È stato evitato, infatti, l'uso estensivo di poche specie su aree di grande dimensione. L'indagine ha accertato un esito mediocre degli impianti di arboricoltura in conseguenza delle molteplici limitazioni che caratterizzano il territorio regionale (Tab. 7.4).

Impianto	Tessitura terreno	Hm	Hmi	Dm	Ai
4_426_25	franchi, da molto sottili a moderatamente profondi	6,17	3,93	6,09	8,77
1_101_1	franco argillosi, sottili con substrato entro i 50 cm, rocciosi	6,06	3,2	8,28	6,13
1_101_3	franco argillosi, sottili con substrato entro i 50 cm, rocciosi	6,05	3,07	7,97	6,42
2_203_7	argillosi, moderatamente profondi	5,94	2,2	8,8	4,7
1_101_2	franco argillosi, sottili con substrato entro i 50 cm, rocciosi	5,78	2,60	10,00	10,17
2_204_8	franchi, franco argillosi da moderatamente profondi a profondi	5,09	2,23	7,62	9,75
3_306_5	argilloso profonda 20-40% pendente	5,08	2,56	7,44	6,34
1_109_14	franco argillosi, profondi	4,63	2,24	9,16	8,35
2_201_3	franchi, profondi	4,55	2,06	5,84	3,35
3_308_21	franchi, moderatamente profondi, a drenaggio mediocre franco sabbiosi, profondi	3,39	0	5,64	8,84

Tabella 7.4 Confronto dei parametri dendrometrici tra impianti differenziati per caratteristiche pedologiche.

È necessario notare, inoltre, che le carenze del sistema vivaistico regionale, sia pubblico sia privato, costituiscono un ostacolo alla realizzazione di nuovi impianti. In queste condizioni, il rischio derivante dall'introduzione di materiale di propagazione proveniente da regioni di provenienza diverse da quelle di impianto è reale e foriero di gravi fenomeni di inquinamento genetico dei popolamenti spontanei presenti nonché di diffusione di fitopatie che in Puglia ancora non si sono diffuse.

Tecniche colturali e gestione degli impianti.

La ricerca ha accertato che nella maggior parte degli impianti, ed in particolare per quelli di arboricoltura da legno, i proprietari, così come i progettisti, si sono trovati ad improvvisare tipologie e tecniche di realizzazione e gestione non sempre note e al più estrapolate da contesti territoriali con caratteristiche diverse.

I periodi di spiccata aridità che caratterizzano la regione Puglia rappresentano un fattore limitante che può essere contrastato solo con il ricorso continuo e massiccio alla pratica

4. Metodologie per la stima degli assorbimenti di CO₂ da parte dei sistemi forestali.

irrigua (Fig. 7.21) che nella maggior parte dei casi non può ritenersi sostenibile dal punto di vista ambientale ed economico. I modelli di impianto anche di tipo misto con altre specie, messi a punto in altri ambienti (i.e. Italia settentrionale e centrale), richiedono comunque di essere riconsiderati ed adattati alle diverse condizioni climatiche che possono essere riscontrate in Puglia.



Figura 7.21 Impianto di irrigazione in popolamento di *Juglans regia*.

Un altro fattore da considerare è la marginalità economica che caratterizza in genere gli impianti forestali e che è dovuta nella maggior parte dei casi alla eccessiva frammentazione, alla carenza di infrastrutture e viabilità, alla mancanza di azioni di promozione della filiera legno a distanze ragionevoli dagli impianti, alla carenza di assistenza tecnica adeguata e alla scarsa conoscenza dei moduli colturali e delle problematiche dell'arboricoltura da legno

Durante i rilievi è stata accertata, infine, un'alta percentuale di piante con danni da attrezzi meccanici. Ciò ha un diverso peso a seconda che ci si riferisca a impianti di arboricoltura da legno o imboschimenti a fini naturalistici: nel primo caso i danni che ne derivano

incidono significativamente sulle finalità dell'impianto perché le ferite rappresentano via preferenziale di accesso delle fitopatie e determinano perdita di valore delle piante danneggiate.

Dall'analisi degli aspetti appena descritti emerge una oggettiva difficoltà nel realizzare impianti forestali per arboricoltura sul territorio pugliese.

L'arboricoltura da legno di qualità è praticabile solo in condizioni ambientali ottimali per le specie arboree impiegate: nel caso dell'impiego esclusivo di noce e ciliegio si nota come solo poche zone della Puglia garantiscono condizioni ecologiche idonee alla coltivazione di queste due specie.

Il quadro fitopatologico seriamente compromesso del ciliegio che è stato riscontrato in molti degli impianti presi in considerazione è una riprova della non idoneità del territorio pugliese all'impiego di questa specie.

Per l'arboricoltura di quantità, invece, non si dispone di un quadro di conoscenze sufficientemente adeguato in merito alle specie potenzialmente impiegabili. L'ipotesi di impiego della robinia o dell'olmo siberiano è da valutare con dovuta cautela in considerazione della spiccata capacità pioniera delle due specie per la cui caratteristica sono da ritenersi infestanti.



Figura 7.22 Impianto con impiego prevalente di *Ulmus pumila*.

Queste prime valutazione potranno essere riprese in considerazioni nel corso dei prossimi anni quando i rilievi nelle aree sperimentali continueranno. D'altra parte è noto che i tempi nella ricerca forestale sono lunghi e un primo giudizio dopo 10 anni dall'impianto non può essere considerato certamente esaustivo. In futuro sarà possibile avere una valutazione degli incrementi in biomassa per la singola tipologia realizzata e sarà possibile, quindi, integrare i dati provenienti dal secondo inventario forestale.

7.8 Il contributo degli impianti forestali all'assorbimento del carbonio

7.8.1 Le stime di carattere generale

Per gli impianti forestali realizzati in Italia nel periodo 1990-2000 fruendo dei finanziamenti comunitari previsti dal Regolamento CEE 2080/92, il Ministero dell'Ambiente (2002), ha stimato un assorbimento complessivo nel periodo di riferimento 2008-2012 pari a circa 1 Mt CO₂ all'anno. Secondo la stessa fonte, un uguale assorbimento di diossido di carbonio potrebbe avvenire, nel medesimo intervallo temporale di riferimento, dagli impianti realizzati nel periodo 2003-2008, prevedendo per questi ultimi una superficie totale di circa 40000 ha.

Facendo riferimento alla sola biomassa cormometrica, Anderle *et al.* (2002) riportano per i rimboschimenti attuati negli anni dal 1990 al 2000 una potenzialità di assorbimento inferiore a quella precedentemente indicata e pari a 0,63 Mt di CO₂ anno⁻¹. I medesimi Autori hanno elaborato delle previsioni anche sulle potenzialità di assorbimento nel periodo di riferimento (2008-2012) da parte di tutti i rimboschimenti realizzati in Italia dal 1990 in poi. Tali previsioni sono risultate oscillanti, in relazione agli scenari ipotizzati, da circa 1,0 a circa 2,1 Mt di CO₂ anno⁻¹.

7.8.2 I dati sperimentali

In Italia sono stati recentemente condotti alcuni studi di carattere sperimentale riguardanti l'assorbimento del carbonio in piantagioni forestali. Gli studi hanno avuto lo scopo di verificare alcuni aspetti dei processi di sequestro del carbonio nell'ambito di sistemi forestali di origine artificiale ed anche di meglio chiarire il ruolo svolto dalla componente ipogea nei processi considerati.

Tra questi lavori si cita l'indagine condotta da Magnani *et al.* (2005) in un giovane rimboscimento misto di latifoglie realizzato su terreni ex-agricoli della pianura padana in comune di Nonantola, provincia di Modena. Si tratta di un impianto a prevalenza di frassini, farnia, acero campestre, pioppi e salici, su terreno tendenzialmente argilloso ed in situazioni rappresentative di varie realtà presenti in questo territorio. In questo studio con la tecnica dell'*Eddy Covariance* sono stati misurati valori medi di scambio netto dell'ecosistema pari a $3,4 \text{ t C ha}^{-1} \text{ anno}^{-1}$. Inoltre, è interessante sottolineare che gli incrementi dendrometrici, gli unici considerati nelle stime di carattere generale elaborate da Anderle *et al.* (2002), hanno rappresentato solo il 46% del C fissato complessivamente dall'ecosistema, mentre il 41% è risultato costituito dalla componente ipogea (radici+suolo). La Fig. 7.23 riporta le curve di modellizzazione degli scambi netti dell'ecosistema nell'impianto di Nonantola.

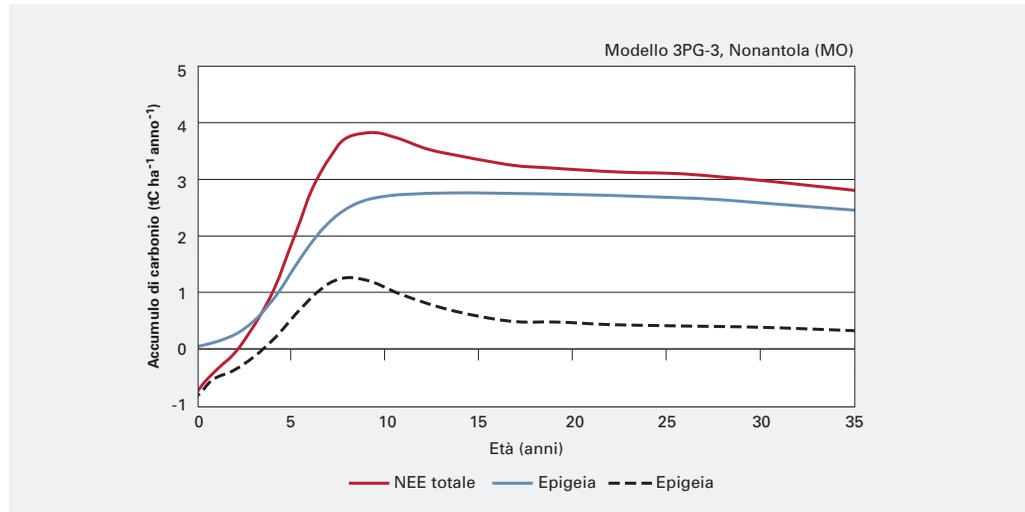


Fig. 7.23 Scambio netto dell'ecosistema ripartito nelle componenti epigea ed ipogea nella foresta di Nonantola in base al modello 3PG-3 (da Magnani *et al.*, 2005).

Le caratteristiche produttive dell'impianto in oggetto, nel quale è stato rilevato un incremento medio di massa dendrometrica pari a $7 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ anno}^{-1}$ all'età di 12 anni, possono ritenersi non molto distanti da quelle registrate in altri impianti di latifoglie italiani. Infatti, in impianti di noce e di ciliegio da legno sono state osservate produttività medie pari, rispettivamente, a $1,7\text{-}2 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ anno}^{-1}$ riferite al volume del solo tronco da lavoro (Fig.7.24) (Mercurio e Minotta, 2000; Di Vaio e Minotta, 2005) ed a $3,5\text{-}5 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ anno}^{-1}$ riferite al volume cormometrico (Minotta, 2007). Pertanto, anche per queste ultime piantagioni, anch'esse quasi sempre realizzate su terreni ex-agricoli, potrebbe essere ipotizzabile una

7. Inventario Forestale Nazionale (INFC) e ruolo delle piantagioni forestal

capacità di sequestro del carbonio a livello ecosistemico non molto dissimile da quella registrata nell'impianto di Nonantola, fatte salve ovviamente le possibili differenze legate, tra l'altro, alle caratteristiche pedologiche delle aree interessate.

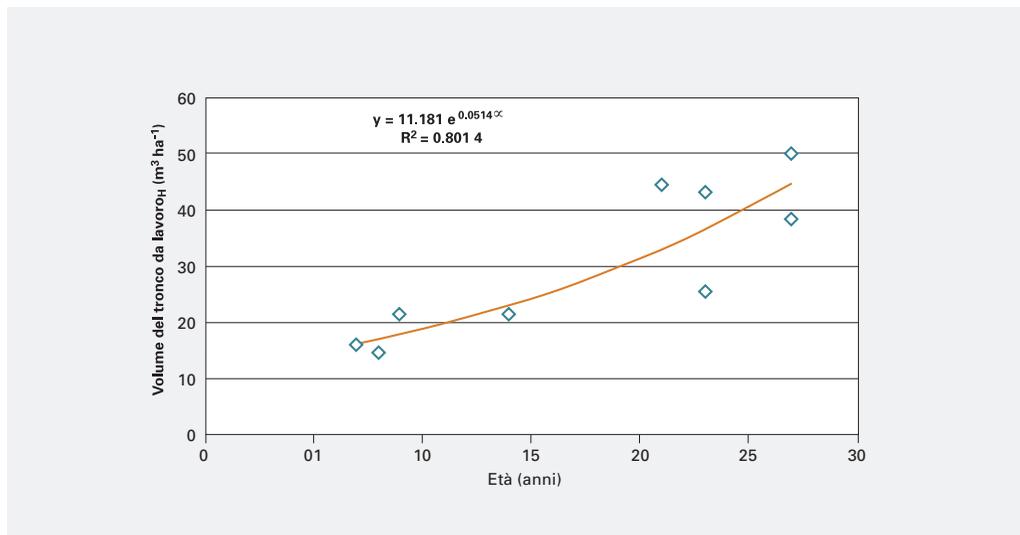


Figura 7.24 Volume del tronco da lavoro in funzione dell'età dell'impianto in noceti da legno della Campania (da Di Vaio e Minotta 2005).

Sulla base dei risultati ottenuti a Nonantola, Magnani *et al.* (2005) hanno stimato, per i rimboschimenti realizzati dal 1990 al 2000, un potenziale assorbimento di 1,37 Mt di CO₂ anno⁻¹, più che doppio rispetto a quanto ipotizzato da Anderle *et al.* (2002). Inoltre, riportando gli stessi dati al periodo di riferimento 2008-2012, la capacità di assorbimento dei suddetti impianti aumenta a circa 1,51 Mt di CO₂ anno⁻¹.

Altri lavori sperimentali condotti sia in Italia che all'estero hanno posto in evidenza l'effetto positivo del rimboschimento dei terreni agricoli sulla capacità di assorbimento del carbonio nella componente suolo dell'ecosistema. Del Galdo *et al.* (2003) in aree dell'Italia nord-orientale hanno stimato un aumento del C presente nel suolo pari al 23 % ed al 6 % alla profondità di 0-10 e 10-30 cm rispettivamente, in un terreno rimboschito artificialmente da 20 anni rispetto ad un suolo coltivato a mais, unitamente ad un effetto positivo del rimboschimento sulla stabilità della sostanza organica nel terreno. In aree dell'Inghilterra sud-orientale Poulton *et al.* (2003) riportano un guadagno netto di carbonio organico nel suolo, fino ad una profondità di 69 cm, pari a 1,39 ed a 1,98 t CO₂ ha⁻¹ anno⁻¹ rispettivamente in terreni a reazione acida e neutra dopo circa 120 anni dall'abbandono delle pratiche agricole e rimboschiti per via naturale. L'accumulo di carbonio nel terreno

conseguente al cambiamento dell'uso del suolo da agricolo a forestale è però un processo di lungo periodo. Tonon *et al.* (dati non pubblicati) hanno individuato in aree della provincia di Ferrara un progressivo aumento del carbonio organico passando da terreni agricoli a rimboschimenti di 19 anni di età, a suoli boscati da alcuni secoli. D'altra parte il processo inverso, cioè l'eliminazione del bosco seguita dalla realizzazione di colture intensive da legno può determinare, almeno nel breve periodo, una perdita di sostanza organica, come evidenziato negli Stati Uniti da Sanchez *et al.* (2007) in terreni disboscati per lasciare il posto ad impianti di short-rotation-forestry destinati alla produzione di biomassa lignocellulosica.

7.9 Conclusioni

In Italia l'assorbimento di carbonio da parte delle "Kyoto forests" è valutabile, all'anno 2012, intorno a 1,4-1,5 Mt di CO₂ anno⁻¹. Questo valore costituisce circa l'1,8% dell'incremento medio annuo dello stock totale di carbonio riferibile a tutto il sistema forestale italiano nel periodo 1986-2006 calcolato secondo il modello elaborato da Federici *et al.* (2008). Il dato relativo alle piantagioni appare comunque significativo se rapportato al contributo complessivo di 10,2 Mt CO₂ eq. anno⁻¹ che il settore forestale italiano deve fornire per il raggiungimento degli obiettivi del Protocollo (Ministero dell'Ambiente 2002). Pertanto, in Italia le piantagioni forestali possono contribuire in maniera sensibile al sequestro della CO₂ atmosferica e quindi al raggiungimento degli obiettivi del Protocollo di Kyoto almeno quando gli impianti sostituiscono le tradizionali colture agricole intensive. Questo contributo è fornito dall'accumulo di carbonio sia nella biomassa arborea epigea ed ipogea, sia nel suolo sotto forma di sostanza organica.

La lunghezza del turno delle piantagioni può però incidere sull'entità dei processi di accumulo ed anche il ciclo di vita degli assortimenti legnosi ottenuti influisce sui tempi di ritorno del carbonio in atmosfera (Nabuurs e Sikkema, 1998).

In relazione a ciò è ragionevole pensare che le piantagioni più efficaci in termini di sequestro del carbonio siano quelle a turno medio o lungo e destinate alla produzione di assortimenti da opera impiegati nella realizzazione di manufatti caratterizzati da cicli di vita anch'essi relativamente lunghi (manufatti per l'edilizia, arredi esterni, mobili di media e alta gamma). Turni brevi o molto brevi realizzati con specie a rapida crescita (es. pioppicoltura tradizionale, short-rotation-forestry, etc.), potrebbero ridurre le possibilità di sequestro del carbonio, soprattutto nel suolo, qualora dopo uno o pochi cicli colturali si verificasse il ritorno alle normali pratiche agricole.

Allo stato attuale, tra i modelli colturali che maggiormente si avvicinano alle condizioni indicate si citano gli impianti di latifoglie con legno di pregio destinati a fornire, con turni medi intorno ai 35-40 anni od anche superiori, assortimenti da trancia, ovvero

7. Inventario Forestale Nazionale (INFC) e ruolo delle piantagioni forestal

le piantagioni di conifere finalizzate ad ottenere, con turni intorno ai 50 anni, segati di qualità. Pertanto la diffusione di questi modelli culturali potrebbe essere ulteriormente incentivata anche come misura complementare nel settore forestale per la mitigazione dei cambiamenti climatici. Si sottolinea però che dette colture devono essere collocate su aree ex-agricole ad esse pienamente idonee dal punto di vista pedologico e climatico, pena la perdita di efficacia dal punto di vista sia economico che ambientale.

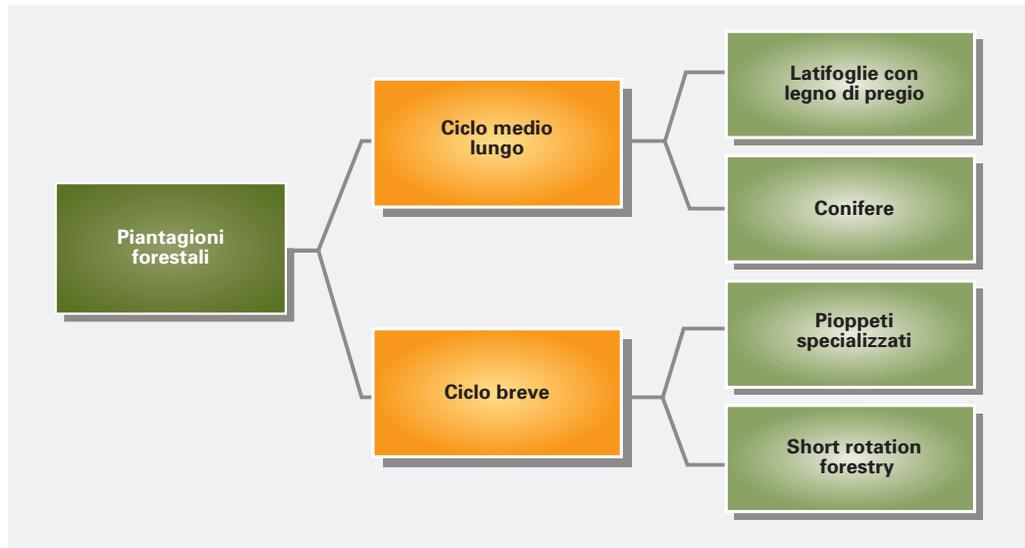


Figura 7.25 Schema sinottico delle piantagioni forestali.



Figura 7.26 Giovane piantina di Pino laricio su sciara lavica (Etna- Sicilia).





8

Orizzonti operativi della pianificazione e della gestione forestale a supporto delle politiche sui cambiamenti climatici

Piermaria Corona, Anna Barbati

8.1 Introduzione

Nei boschi italiani è in atto un generalizzato processo di invecchiamento collegato alla relativamente ridotta quantità di prelievi di legname rispetto alla produzione naturale e all'allungamento dei turni nei soprassuoli coetanei. Ciò sta portando a un lento accumulo di sostanza organica nei suoli forestali, peraltro a livelli ancora mediamente lontani dal massimo potenziale. Lo scambio netto di carbonio dell'ecosistema, al contrario, viene limitato dalla riduzione/assenza di interventi di gestione a causa della decomposizione della sostanza organica caduta al suolo. In relazione a quest'ultimo aspetto, vari operatori del settore propongono un consistente aumento dei prelievi che, oltre a consentire una maggiore immobilizzazione di carbonio nei prodotti legnosi, potrebbe agire da volano sugli ecosistemi forestali, riducendone l'età media e aumentandone, allo stesso tempo, il saggio di incremento. Questa prospettiva va però considerata in modo prudente e, comunque, non va generalizzata: infatti, per ampia parte del patrimonio forestale nazionale le provvigioni legnose sono ancora relativamente deficitarie. Di fatto, la capacità delle foreste di sequestrare carbonio va inquadrata nella prospettiva di una gestione globalmente sostenibile (Ciancio *et al.*, 1999).

Sotto il profilo della pianificazione, questo approccio prevede di favorire:

- la complessità della composizione dendrologica e della struttura orizzontale e verticale dei soprassuoli;
- il rispetto dei cicli naturali di rinnovazione;
- il recupero dei popolamenti che, a causa di una gestione intensiva, hanno perduto le proprie caratteristiche naturali (l'incremento della quantità di carbonio sequestrabile a seguito del recupero delle situazioni di degrado del patrimonio forestale nazionale è stimato non inferiore a 1.3 Mt/anno, vd. Corona *et al.*, 1997).

Sotto il profilo operativo, le opzioni tecniche selvicolturali conseguenti all'approccio di cui sopra sono molteplici e si configurano in:

- forme di trattamento che riducono la superficie unitaria delle tagliate a raso;
- forme di trattamento che facilitano la conservazione di una copertura continua nel tempo anche se temporaneamente più rada;
- forme di trattamento che agevolano la rinnovazione naturale (teoricamente hanno l'opportunità di favorire, entro certi limiti, specie arboree potenzialmente più adattabili ai cambiamenti climatici in relazione alla stazione);
- forme di trattamento che aumentano il livello di stabilità del bosco e di difesa da fattori abiotici (in particolare, incendi) e biotici (la suscettibilità di un soprassuolo è principalmente correlata alle caratteristiche della sua struttura e alle caratteristiche ecofisiologiche delle specie arboree che lo compongono);
- calibrato aumento delle provvigioni e, in taluni boschi coetanei, allungamento del turno, con conseguente maggiore accumulo di sostanza organica nel suolo e produzione di assortimenti legnosi di maggiori dimensioni e ciclo di vita più lungo;
- diradamenti che riducono la competizione per le risorse ambientali (a esempio, in ambiente mediterraneo possono ridurre l'esposizione dei popolamenti forestali al rischio di aridità, sebbene l'effetto sia in genere di limitata durata) e possono fornire biomassa intercalare per fibre e/o energia;
- modalità di taglio ed esbosco a basso impatto ambientale (le utilizzazioni forestali asportano carbonio che non ricade quindi al suolo, dove la sua decomposizione aumenterebbe la respirazione dell'ecosistema; al contempo la continua asportazione di nutrienti può deprimere la crescita nel lungo termine), tali da favorire la conservazione degli elementi minerali (a esempio, evitando sistemi di utilizzazione di tipo *whole tree*) e da limitare il compattamento del suolo e l'erosione superficiale.

Occorre tenere conto dell'intera filiera dei prodotti legnosi ritraibili per valutare complessivamente l'effetto della gestione selvicolturale sulla fissazione di carbonio: a

8. Orizzonti operativi della pianificazione e della gestione forestale a supporto delle politiche sui cambiamenti climatici

esempio, nel caso di soprassuoli a crescita relativamente lenta (quali tipicamente quelli di origine naturale, almeno in ambito mediterraneo) non è conveniente indirizzare la produzione verso assortimenti legnosi con ciclo di vita breve (come invece avviene, a esempio, per molte fustaie di cerro il cui prevalente prodotto è attualmente la legna da ardere).

In linea generale per i soprassuoli coetanei, se il ciclo di vita degli assortimenti prodotti è mediamente più breve del turno fisiocratico (corrispondente all'età di culminazione dell'incremento medio della massa legnosa) è conveniente adottare turni più lunghi di esso, mentre, al contrario, se il ciclo di vita degli assortimenti prodotti è mediamente più lungo del turno fisiocratico è conveniente adottare turni più brevi di esso, ammesso che possano essere raggiunte le soglie dimensionali per la produzione degli assortimenti desiderati (Corona *et al.*, 1997). In pratica, considerando l'effetto di massimizzazione complessiva del carbonio atmosferico fissato nel legno e senza tenere conto dell'immagazzinamento di carbonio nel suolo, ne consegue il paradosso, non del tutto avvertito dai tecnici e dai ricercatori, che, come orientamento generale, in Italia occorrerebbe un allungamento dei turni per buona parte dei cedui e una loro riduzione per buona parte delle fustaie coetanee.

8.2 Nuovi impianti forestali

La realizzazione di nuovi impianti forestali può essere operativamente schematizzata in funzione di due diverse finalità:

- realizzazione di rimboschimenti, cioè impianti permanenti destinati a diventare veri e propri boschi, tramite l'adozione di algoritmi gestionali che facciano riferimento alla selvicoltura sistemica;
- realizzazione di piantagioni da legno, cioè impianti potenzialmente reversibili a fine ciclo culturale, che prevedono l'adozione di algoritmi gestionali tipici dell'arboricoltura da legno e l'eventuale impiego anche di specie esotiche non invasive e/o di materiale vivaistico clonale.

8.2.1 Rimboschimenti

I rimboschimenti sono soprassuoli forestali destinati a diventare veri e propri boschi: a tal fine, si opera tramite impianto di specie arboree autoctone corrispondenti a un livello più o meno avanzato della successione vegetazionale che teoricamente si avrebbe a partire da un suolo nudo o quasi. In linea generale, si tende a favorire fin dall'inizio, ove

possibile, la realizzazione di sistemi forestali complessi, prevalentemente plurispecifici, con eventuale impiego anche di componenti arbustive e prefigurando cicli colturali relativamente lunghi, al cui termine viene preferibilmente favorita la rinnovazione naturale del soprassuolo. Le specie impiegate devono essere coerenti con la serie di vegetazione relativa all'unità ambientale e di paesaggio in cui ricade il sito di impianto e, per quanto possibile, il materiale vivaistico deve essere di provenienza locale (Fig. 8.1)



Figura 8.1 Nuovi impianti forestali: rimboschimenti di pino d'Aleppo.

In una logica pianificatoria generale, nella selezione delle aree da destinare al rimboschimento, è opportuno dare priorità a quelle più sensibili al rischio idrogeologico e al rischio di desertificazione, in relazione alle loro caratteristiche bioclimatiche, geolitologiche e geomorfologiche e allo stato di degrado della copertura forestale. In realtà, nel nostro Paese le possibilità di realizzare rimboschimenti su vasta scala, che si giustappongano agli attuali 460.000 ha (INFC, 2007), sono relativamente limitate:

8. Orizzonti operativi della pianificazione e della gestione forestale a supporto delle politiche sui cambiamenti climatici

da un lato si ha un'alta densità della popolazione (quasi 200 abitanti km²), dall'altro si assiste a un sempre più accentuato avanzamento spontaneo del bosco sui terreni abbandonati dall'agricoltura (ricolonizzazione forestale, vd. § 8.2.3). La realizzazione di una rinnovata azione di rimboschimento su 60.000 ha, come previsto dalla Deliberazione CIPE 123/2002, appare comunque realistica (Tab. 8.1): le opportunità dovrebbero riguardare soprattutto interventi di ricucitura ecopaesistica dei boschetti dispersi nelle condizioni più degradate del mosaico territoriale.

Articolo di riferimento del Protocollo di Kyoto	Attività	Assorbimento previsto (Mt CO ₂ anno ⁻¹)	Investimento previsto (Meuro)
3.4	gestione forestale	4.1	10.0*
3.3	imboschimento e rimboschimento (vecchi impianti)	1.0	6.0*
3.3	ricolonizzazione naturale	3.0	6.5*
3.3	imboschimento e rimboschimento (nuovi impianti)	1.0	200.0
3.3	imboschimento e rimboschimento (nuovi impianti su aree soggette a dissesto idrogeologico -L.183/89)	1.0	300.0
3.4	terre agricole, pascoli e rivegetazione	0.1	4.2*

Tabella 8.1 Potenziale previsto di assorbimento di carbonio certificabile ai sensi del Protocollo di Kyoto nel periodo 2008-2012 sul territorio nazionale in relazione alle attività di cui alla Deliberazione CIPE 123/2002.

* *Includono i costi di realizzazione dell'Inventario nazionale dei serbatoi forestali di carbonio e di realizzazione e gestione del Registro nazionale dei serbatoi forestali di carbonio.*

8.2.2 Piantagioni da legno

Oltre alle rilevanti potenzialità per la fissazione di carbonio atmosferico, la realizzazione di piantagioni da legno è caratterizzata da molteplici effetti positivi collaterali, quali lo sviluppo del settore rurale e di quello industriale di prima trasformazione. Questi effetti, però, si realizzano solamente nell'ambito di aziende agricole o agroforestali attive, con imprenditori motivati e in condizioni stazionali idonee, cioè su terreni di adeguata fertilità fisico-chimica: la disponibilità di questi terreni è relativamente limitata, anche perché la maggior parte dei migliori terreni verrà comunque sempre riservata alle colture agricole più redditizie. La previsione complessiva della Deliberazione CIPE 123/2002

di ulteriori 40000 ha da investire a piantagioni da legno, che si giustappongano agli attuali 122.000 ha (INFC, 2007), appare peraltro ben dimensionata.

Ai fini della fissazione di carbonio atmosferico nella progettazione di questo tipo di impianti è utile prevedere una mescolanza di specie arboree con caratteristiche diverse di fototemperamento e rapidità di accrescimento, in modo da ottenere la massima superficie fotosintetizzante fin dalle prime fasi di impianto (specie arboree ad accrescimento veloce, da diradare nel corso del ciclo di coltivazione, insieme a specie a più lento accrescimento). Tra l'altro, gli impianti plurispecifici possono assicurare una diversificazione qualitativa della sostanza organica apportata al suolo, sono più resistenti ai parassiti e alle fitopatie e, in genere, più interessanti da un punto di vista paesaggistico.



Figura 8.2 Impianto di SRF con ibridi di pioppo.

8.2.3 Compatibilità ambientale dei nuovi impianti

Gli impianti forestali, siano essi rimboschimenti o piantagioni da legno (Fig 8.3), possono rappresentare, oltre che nuovi serbatoi di carbonio, elementi sia di criticità, sia di opportunità per la conservazione del paesaggio e della biodiversità a scala nazionale, regionale e locale, a seconda che vengano o meno realizzati e gestiti secondo adeguati criteri di compatibilità ambientale (Tab. 8.2).



Figura 8.3 Nuovi impianti forestali: piantagioni da legno di ciliegio.

In primo luogo, nella progettazione degli impianti devono essere tenuti presenti i rapporti formali che si vanno a instaurare e che possono comportare (Corona, 1993): eventuale rottura del tessuto paesaggistico preesistente; riproduzione di un modulo paesaggistico consolidato; riproduzione di un modulo paesaggistico storicamente presente.

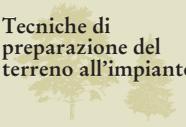
 <p>Idoneità del sito d'impianto</p>	<p>La realizzazione degli impianti non provoca danneggiamento o riduzione di superficie a carico di ecosistemi naturali (habitat d'interesse conservazionistico, boschi, formazioni ripariali) e non comporta l'eliminazione o la riduzione di elementi caratteristici del mosaico paesaggistico locale (a es.: alberi monumentali, piccole zone umide, siepi, ecc.)</p>
 <p>Progettazione dell'impianto</p>	<p>Al fine di favorire condizioni di diversificazione strutturale degli impianti viene creato un mosaico di popolamenti di et e composizione dendrologica differenti, ciascuno di superficie non superiore a 10 ettari e caratterizzati da cicli colturali di lunghezza diversa.</p> <p>Le singole tessere di impianto hanno preferibilmente forme isodiametriche e margini lobati e irregolari coerenti con la natura del substrato geolitologico e l'andamento morfologico del terreno.</p> <p>Viene assicurata la presenza di corridoi ecologici per lo spostamento della fauna selvatica e di fasce di protezione (buffer) lungo i corsi d'acqua.</p> <p>La scelta delle specie (ove possibile più di una) avviene sulla base di criteri d'idoneità ecologica al sito d'impianto.</p> <p>La composizione dendrologica all'interno delle singole tessere di impianto preferibilmente mista.</p>
 <p>Scelta della specie</p>	<p>La scelta di specie esotiche è giustificata solamente per le piantagioni da legno e anche in questo caso solo per motivata superiorità in termini di capacità produttiva/protettiva rispetto a specie autoctone. La piantagione di specie esotiche comunque vincolata a: conoscenza dei processi di diffusione delle specie; protocolli d'intervento per l'eventuale eradicazione in caso di diffusione della specie in ambienti naturali; accertamento che le specie esotiche non siano vettori od ospiti intermedi di organismi dannosi per le specie autoctone.</p>
 <p>Tecniche di preparazione del terreno all'impianto</p>	<p>Viene mantenuta una parziale copertura dei terreni da impiantare, al fine di promuovere la conservazione della sostanza organica e della fertilità stagionale e di ridurre l'apporto di sedimenti nei corsi d'acqua; gli eventuali interventi di decespugliamento devono quindi essere di tipo localizzato, con sminuzzamento dei residui vegetali in loco.</p> <p>Sui versanti, vengono rilasciate fasce di terreno sodo che ne contrastano il rischio di cedimento e favoriscono la rideposizione dei sedimenti lungo la pendice</p> <p>Sui versanti, le lavorazioni del suolo sono attuate secondo le curve di livello e in associazione a eventuali piccoli interventi sistematori.</p>

Tabella 8.2. Esempio di orientamenti operativi per la realizzazione di impianti forestali ecologicamente compatibili.

In secondo luogo, le tecniche di realizzazione degli impianti devono avere l'obiettivo prioritario di ridurre l'erosione superficiale e incanalata del suolo e la perdita di sostanza organica: sotto il profilo tecnico, il fattore decisivo è la corretta preparazione del suolo (Corona *et al.*, 1996).

In terzo luogo, va considerata la scelta del materiale di impianto (anche in termini di specie e provenienze in grado di adattarsi a condizioni ambientali relativamente più calde e secche di quelle attuali). La disponibilità di materiale vivaistico di qualità è essenziale ai fini della riuscita degli impianti e, in tal senso, va evidenziata l'attuale criticità del reperimento di idoneo materiale di impianto; a livello operativo, il settore sementiero-vivaistico forestale è ancora largamente ordinato in funzione della legge 269/1973, la cui applicazione è stata peraltro parziale; il quadro normativo è entrato in una fase dinamica legata all'adeguamento della legislazione nazionale (D.L. 386/2003) e regionale agli indirizzi di cui alla direttiva comunitaria 105/1999, ma in pochi casi si registrano ricadute pienamente positive a livello operativo.

8.3 Ricolonizzazione boschiva

Uno dei principali fattori che negli ultimi decenni hanno caratterizzato, e ancora oggi caratterizzano, la dinamica del mosaico territoriale nel nostro Paese è la ricolonizzazione spontanea dei paesaggi rurali da parte delle cenosi boschive (il tasso di espansione può essere quantificato intorno a 0.6% all'anno), fenomeno che implica sempre un aumento di fissazione di carbonio atmosferico per unità di superficie (Figg. 8.4 e 8.5).

La ricolonizzazione boschiva può essere contabilizzata ai fini del Protocollo di Kyoto se la destinazione dei terreni alla dinamica dei processi naturali risulti effetto di politiche esplicite di contenimento delle produzioni agricole o di protezione della natura. Tale destinazione può essere ottenuta attraverso il semplice abbandono di seminativi, prati e pascoli, con l'accortezza di prevenire eventi degradanti (a esempio, passaggio del fuoco); in situazioni pedoclimatiche difficili (a esempio, elevata pietroosità superficiale), possono anche essere di interesse interventi di sostegno, con operazioni che vanno dalla semina all'impianto di specie arbustive a carattere pioniero. Un ampio studio condotto in Abruzzo ha dimostrato come fattori ambientali quali la pendenza del terreno e la presenza di superfici forestali circostanti sono predittori molto efficaci della suscettività di un territorio alla ricolonizzazione boschiva e si prestano a essere utilizzati in ambito pianificatorio per la scelta delle aree da destinare esplicitamente a tale fenomeno e da poter poi contabilizzare ai sensi del Protocollo di Kyoto (Corona *et al.*, 2008).

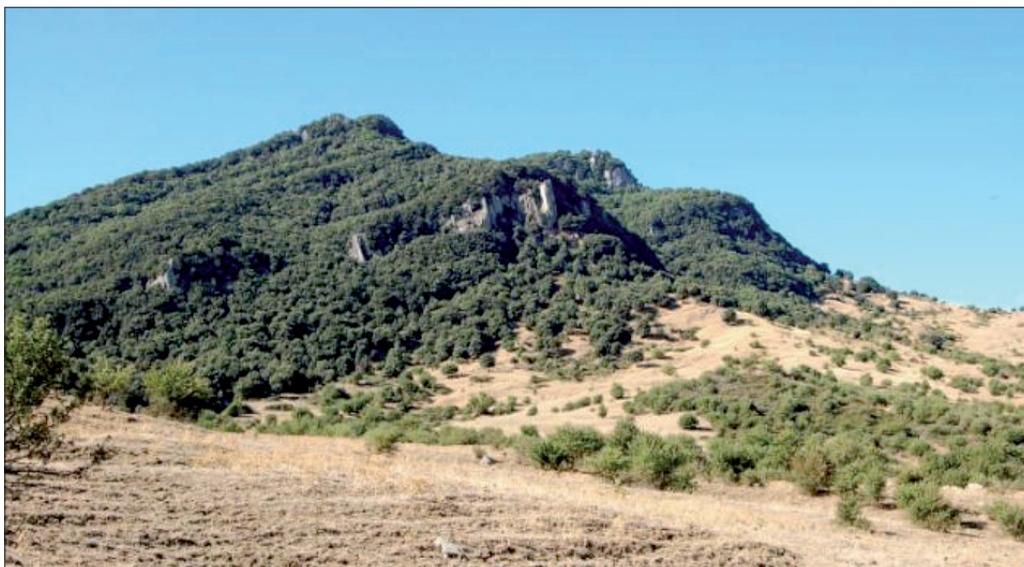


Figura 8.4 Ricolonizzazione boschiva: espansione delle superfici forestali sui terreni agricoli abbandonati contermini (Foto: T. La Mantia).

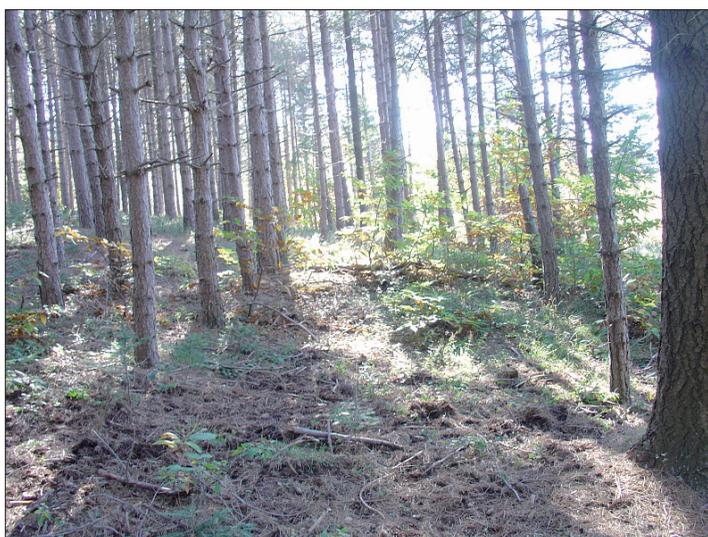


Figura 8.5 Fenomeno di rinaturalizzazione in un impianto di origine artificiale.

8.4 Attivazione della gestione e pianificazione

L'attuazione di misure di gestione forestale nel rispetto di una logica di sostenibilità è favorita dalla disponibilità da parte dei portatori di interesse (enti locali, consorzi forestali, singoli proprietari privati, ditte boschive, ecc.) di idonei strumenti di programmazione e incentivazione delle attività selvicolturali. Azioni concrete di sostegno alla gestione e alla valorizzazione delle risorse forestali e all'estensione delle superfici boschive sono in essere in molte realtà, soprattutto attraverso normative nazionali e regionali che:

- riconoscono l'obbligatorietà dello strumento di piano per la programmazione delle attività e gli interventi nel settore forestale, a livello regionale (piano forestale regionale), comprensoriale (piano forestale di indirizzo territoriale) e aziendale (piano di assestamento e gestione forestale);
- riconoscono la specifica centralità dell'inventariazione e del monitoraggio delle risorse forestali, a vari livelli (azienda, consorzi di aziende/comprensorio, regione, nazione), nella prospettiva di un approccio gestionale di tipo adattativo, basato sull'osservazione e interpretazione delle trasformazioni in atto, siano esse marginali o strutturali, che costituiscono il risultato delle azioni di intervento, e formalizzazione delle conoscenze tramite appositi indicatori;
- definiscono le azioni di tutela (lotta agli incendi boschivi, regolamentazione del pascolo, lotta fitosanitaria) e i limiti di uso del bosco (a esempio, trasformazioni di uso);
- disciplinano le attività selvicolturali per garantire la salvaguardia della complessità e l'uso multiplo del bosco in rapporto alla varietà di contesti ambientali e socio-economici di applicazione.

Di fatto, le misure a favore delle foreste previste dal nuovo Regolamento per lo Sviluppo Rurale (2007/2013) offrono ampie opportunità ai fini dell'implementazione dei suddetti strumenti, attraverso:

- aiuti agli interventi strutturali previsti all'interno dei piani di gestione per il miglioramento del valore economico delle foreste (art. 27) sia di proprietà privata che pubblica, per i quali è previsto un sostegno pubblico del 50% sulla spesa ritenuta ammissibile, sostegno che può giungere fino al 60% nelle aree Natura 2000, nelle zone di montagna, e nelle altre aree svantaggiate;
- introduzione del rispetto, da parte dei beneficiari che ricevono l'aiuto, di criteri di gestione obbligatori su tutta la superficie aziendale; tale obbligo è previsto per alcune misure tipicamente indirizzate alle aziende agricole (imboschimento), ma da varie Regioni esteso anche ad altre misure forestali;

- misure di compensazione o pagamenti ambientali forestali (art. 47), ovvero la possibilità di erogare un sostegno tra 40-200 euro ha⁻¹anno⁻¹ ai proprietari forestali per la copertura dei costi aggiuntivi derivanti da impegni di gestione del bosco che vanno “al di là della usuale pratica forestale” (buone pratiche forestali), codificati attraverso requisiti obbligatori da rispettare per un periodo compreso almeno tra cinque e sette anni;
- concessione per tutti i proprietari forestali di contributi per la ricostituzione delle foreste danneggiate da incendi e disastri naturali e per l'introduzione di misure di prevenzione (art. 48).

L'implementazione di queste tipologie di strumenti a livello territoriale configurano il livello di recepimento e di attuazione della gestione forestale sostenibile nel quadro legale-politico-amministrativo nel quale si muove il soggetto gestore. In questo modo i proprietari di boschi possono essere messi nelle condizioni di coniugare la gestione sostenibile e la qualità dell'ambiente con la possibilità di non deprimere l'utilizzazione delle produzioni forestali e la correlata immobilizzazione di carbonio atmosferico.

Alla luce delle indicazioni del Piano Europeo per le Foreste (CEC, 2006) risulta fondamentale il partenariato Stato-Enti locali focalizzato sulla valorizzazione del settore privato. Uno strumento decisivo può essere la creazione di strutture associative, dato che, come noto, la frammentazione della proprietà è una peculiare caratteristica negativa dei boschi privati nel nostro Paese. Progetti di ricomposizione fondiaria sono stati più volte tentati, ma con risultati perlopiù modesti. Sebbene, nelle sue varie forme, si sia rivelato, almeno finora, una soluzione di non facile o comunque di non generalizzabile applicabilità, l'associazionismo può rappresentare una chance per lo sviluppo del settore forestale privato, anche ai fini della attuazione di politiche e misure di gestione finalizzate alla massimizzazione della fissazione di carbonio atmosferico. Oltre ad appositi strumenti tecnico-giuridici (sgravi fiscali), una concreta possibilità di attivazione dell'associazionismo può essere di collegare operativamente la gestione a forme di pianificazione a basso costo.

8. Orizzonti operativi della pianificazione e della gestione forestale a supporto delle politiche sui cambiamenti climatici

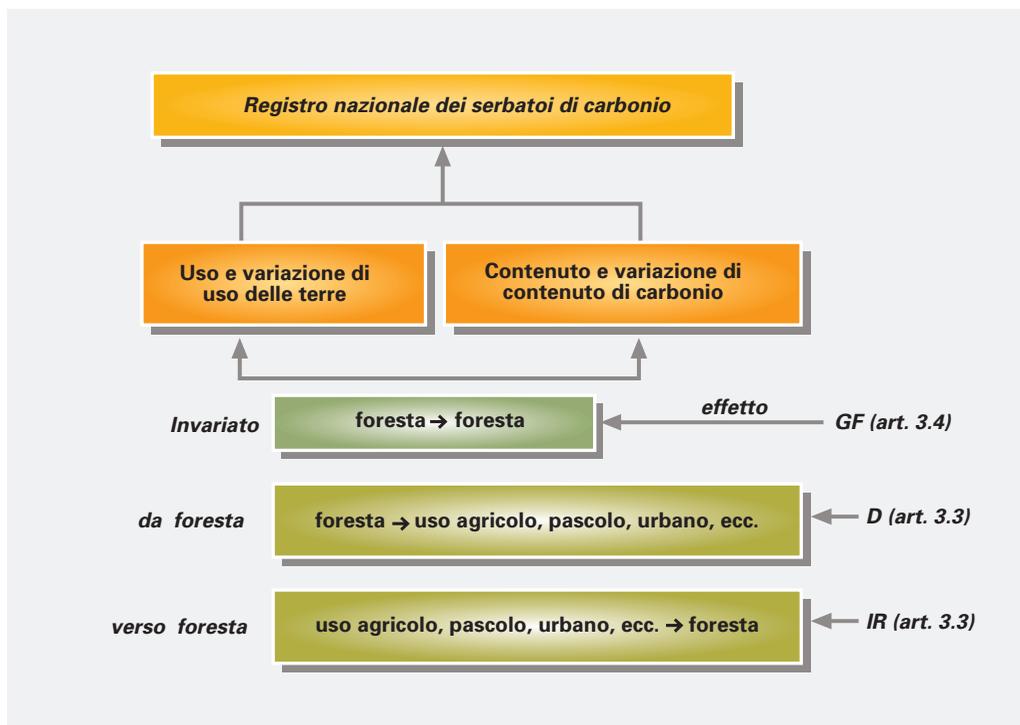


Figura 8.6 Sistema di contabilità del carbonio dall'uso delle terre (GF = gestione selvicolturale; D = disboscamento; IR = imboschimento/rimboschimento; tra parentesi gli articoli di riferimento del Protocollo di Kyoto).

Un aspetto critico riguarda comunque i meccanismi distributivi del valore finanziario ritraibile dall'effetto di sequestro del carbonio atmosferico ai sensi del Protocollo di Kyoto. Attualmente, a fronte di un valore superiore a 500 milioni di euro a livello nazionale per il primo periodo di impegno, non esistono meccanismi redistributivi a favore dei singoli proprietari forestali: questo è invece un aspetto che dovrebbe trovare particolare considerazione sia a fini normativi sia nella configurazione del Registro nazionale dei serbatoi forestali di carbonio (Fig. 8.6).

Peraltro, da parte dei proprietari è possibile operare su base volontaria richiedendo la certificazione del carbonio sequestrato nelle loro superfici forestali e, se ammissibile, commercializzarne i crediti (*emission trading*). Un esempio di successo è l'accordo "No Effetto Serra Forest" stipulato dal Comune di Rocca di Papa (Roma) con la Fondazione Terra Onlus tramite l'Ente Parco Regionale dei Castelli Romani. L'accordo prevede la

compensazione per due anni della CO₂ emessa dalla società Bat Italia SpA, per un totale di 7200 t CO₂ da fissare; le aree messe a disposizione dal Comune per il conseguimento del suddetto obiettivo ambientale sono costituite da 337 ha di cedui di castagno; a fronte dell'impegno di mantenere immutato lo stato di questi cedui nei due anni di validità dell'accordo viene corrisposto al Comune e al Parco un contributo complessivo di 75.000 euro (includente le spese di progettazione, cartellonistica, verifica e controllo).

Il positivo ruolo di catalizzatore svolto dall'Ente Parco nell'esperienza di Rocca di Papa evidenzia l'importanza di un approccio partecipativo in grado di coinvolgere fattivamente i portatori di interessi (in primo luogo i proprietari forestali). Da sottolineare anche la sempre maggiore rilevanza dei sistemi di supporto alle decisioni, tanto più utili quanto più la gestione forestale viene configurata in una ottica multifunzionale e quanto più le condizioni al contorno diventano incerte, come appunto quelle previsionali in un contesto di cambiamenti ambientali.

8.5 Conclusioni

L'attuale contesto di cambiamenti ambientali comporta rischi e opportunità per le foreste italiane. La gestione selvicolturale può stimolare la fissazione di carbonio atmosferico da parte delle foreste, ma il bilancio netto globale dipende in buon parte dalle dinamiche complessive della filiera foresta-legno, in relazione al destino finale degli assortimenti ritraibili.

Ricapitolando, le prospettive operative di gestione forestale nell'ambito delle politiche e misure nazionali di riduzione delle emissioni di gas serra possono essere inquadrare in funzione di: protezione, rinaturalizzazione e uso produttivo dei boschi esistenti; rinaturalizzazione di terreni privi di copertura forestale, tramite rimboschimento; realizzazione di piantagioni da legno.

A scala globale, la più urgente e significativa misura da adottare nel settore forestale rimane comunque la riduzione dei fenomeni di deforestazione, i quali contribuiscono per circa un quarto alle emissioni di CO₂ a livello planetario, coinvolgendo ben 15 milioni di ettari all'anno (FAO, 2005), seppure con un certo rallentamento complessivo negli ultimi due decenni.

8. Orizzonti operativi della pianificazione e della gestione forestale a supporto delle politiche sui cambiamenti climatici

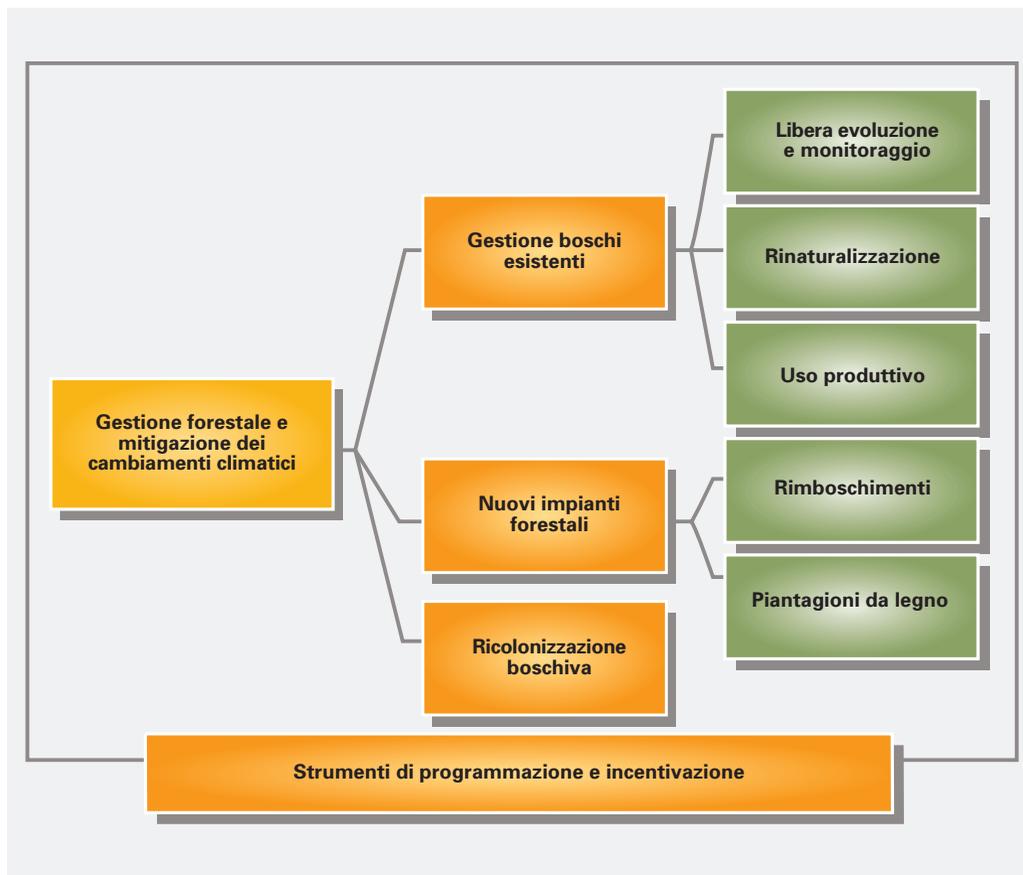


Figura 8.7 Schema sinottico della pianificazione e della gestione forestale nella mitigazione dei cambiamenti climatici.





9

Gli interventi di gestione forestale che possono mitigare il cambiamento climatico

Davide Pettenella, Lorenzo Guerci

“Forestry can make a very significant contribution to a low-cost global mitigation portfolio that provides synergies with adaptation and sustainable development.”

Intergovernmental Panel on Climate Change, Fourth Assessment Report, 2007.

9.1 Introduzione

Nei capitoli precedenti è stato presentato un quadro sintetico delle politiche e delle iniziative avviate in campo internazionale e nazionale al fine di mitigare il fenomeno dei cambiamenti climatici. Nel complesso panorama delle attività connesse all’attuazione del Protocollo di Kyoto si è analizzato il ruolo svolto dalle foreste sia come serbatoi di carbonio sia come fonte diretta di gas in seguito a fenomeni di deforestazione, infine si è accennato ad iniziative volontarie di compensazione ambientale in campo forestale.

Stando a quanto stabilito negli accordi internazionali, il settore forestale può quindi concorrere alla mitigazione dei cambiamenti climatici sia attraverso la realizzazione di nuovi boschi - incremento della funzione di *sink* - sia mediante l’implementazione di forme di gestione forestale sostenibile che garantiscono la conservazione e l’aumento dello *stock* di C delle foreste nel tempo.

Scopo del presente capitolo è quello di descrivere una serie di interventi a scala regionale realizzabili, fin da subito, al fine di valorizzare ed incrementare lo stock di carbonio dei

popolamenti forestali. A questo riguardo verranno proposti alcuni esempi di iniziative avviate in Regione Lombardia ed altre regioni d'Italia. Si presenteranno poi i benefici apportati dalla creazione di diverse tipologie di nuove foreste e dall'implementazione di forme di gestione forestale sostenibile.

Una particolare attenzione verrà posta al carattere polifunzionale degli interventi proposti; infatti, nel contesto territoriale italiano, politiche di riduzione delle emissioni attraverso i carbon *sink* hanno un senso - e una maggior convenienza economica - soprattutto in ragione della multifunzionalità di questo tipo di interventi. Se il beneficio apportato non si limita soltanto alla funzione di C-*sink*, ma interessa anche la funzione paesaggistica, sociale, protettiva, produttiva, idrogeologica svolta dal bosco, gli interventi forestali acquistano una maggiore e più evidente sostenibilità economica e possono trovare spazio all'interno di diverse iniziative di finanziamento pubblico.

Prima di esemplificare alcuni interventi nel settore forestale utili al conseguimento degli obiettivi posti da Protocollo di Kyoto è opportuno definire quali sono le reali opportunità e le difficoltà legate alla funzione di *sink* dei boschi.

9.2 Potenzialità e limiti delle foreste come serbatoi di carbonio

Se indiscussa è la capacità di fissazione della CO₂ atmosferica da parte dei tessuti ipogei ed epigei delle piante e del suolo (secondo stime FAO le foreste immagazzinano circa 633 Gt di carbonio - FAO, 2006), è acceso il dibattito sul ruolo del settore forestale nelle strategie di mitigazione del cambiamento climatico.

Gli interventi forestali presentano, infatti, alcuni limiti, primo fra questi è la non-permanenza della CO₂ fissata: i serbatoi di carbonio *in primis* sono limitati da evidenti vincoli di estensione territoriale (in altri termini non si può estendere la superficie forestale oltre certi limiti), inoltre possono facilmente trasformarsi in fonti nette di GHG (Marland *et al.*, 2001) comportando degli squilibri nel ciclo del C forestale (Fig. 9.1). Le cause di degrado in genere aumentano con la crescita della copertura forestale (si pensi agli incendi): oltre certi livelli di estensione e di *stock* i fattori di rischio di distruzione e degrado della foresta sono talmente elevati da suggerire l'adozione di strategie di prevenzione basate sul contenimento dell'espansione e dell'invecchiamento dei soprassuoli.

9. Gli interventi di gestione forestale che possono mitigare il cambiamento climatico

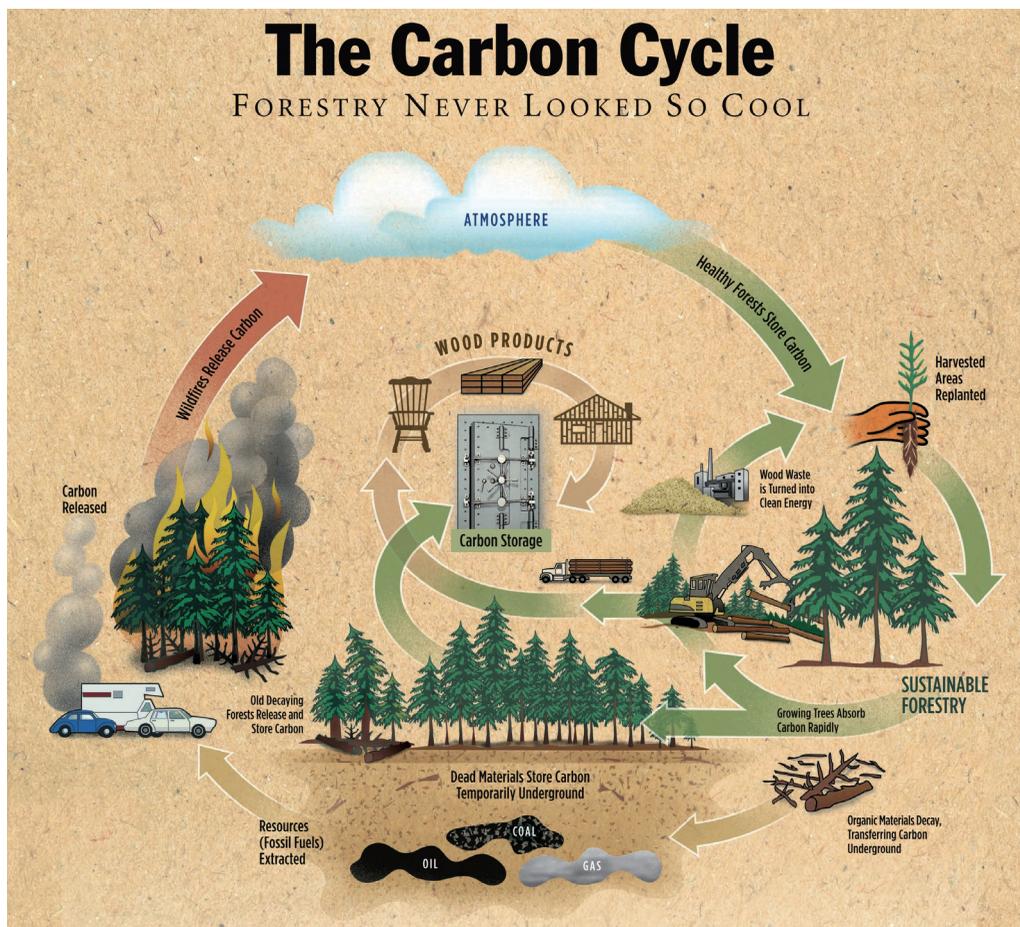


Figura 9.1 Ciclo del carbonio forestale.

Fonte: USDA, 2008 - [//www.fs.fed.us/sustainableoperations/tools-games.shtml](http://www.fs.fed.us/sustainableoperations/tools-games.shtml)

Questi limiti all'espansione dei *sink* forestali sono definiti con il termine “saturazione”, condizione che si verifica con il raggiungimento del potenziale massimo biologico di sequestro di carbonio da parte di un ecosistema forestale. A questo riguardo gli ecosistemi naturali raggiungono nel tempo una condizione di equilibrio oltre la quale la capacità di fissazione del carbonio diviene minima se non addirittura negativa (Fig. 9.2), a meno che non sopraggiungano cambiamenti fisico-ambientali tali da mutare questa situazione (interventi antropici quali tagli, utilizzazioni ecc. o eventi naturali che favoriscano la rinnovazione del bosco).

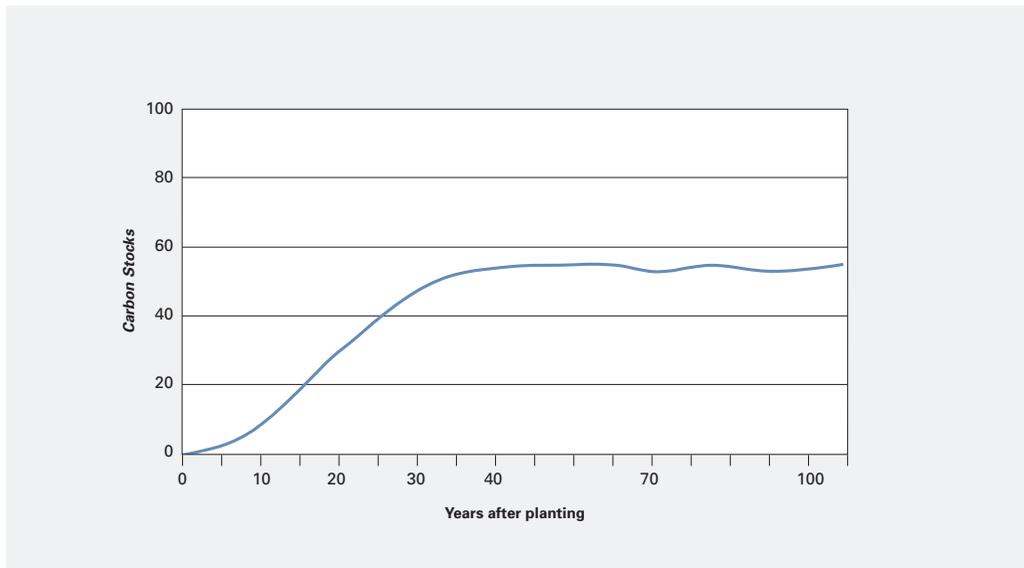


Figura 9.2 Andamento dell'assorbimento di carbonio in presenza di utilizzazioni.

(Fonte: www.greenhousegas.nsw.gov.au/acp/forestry.asp)

9. Gli interventi di gestione forestale che possono mitigare il cambiamento climatico

In ogni caso interventi nel settore forestale possono portare a riduzioni non indifferenti rispetto agli impegni assunti (*costs of compliance*) a livello internazionale, ragione per cui alcuni paesi (soprattutto quelli con ingenti risorse forestali) li hanno sostenuti e promossi in sede di negoziato internazionale. A ciò si aggiunga che esistono ancora molte difficoltà nell'armonizzare le metodologie di stima del carbonio fissato dai sistemi vegetali. Questo comporta un certo grado di errore nel definire la reale capacità di sequestro da parte delle foreste che può portare alla creditizzazione di carbonio non realmente sequestrato, con un aumento indiretto della concentrazione di GHG in atmosfera.

Altre due ragioni che hanno indotto una certa prudenza nel ricorso agli interventi forestali nelle strategie di riduzione dei cambiamenti climatici, e che hanno motivato l'esclusione delle foreste da iniziative quali il mercato dei crediti europeo, sono legati all'addizionalità (un tema già accennato nel cap. 5) e all'effetto "*leakage*".

Il criterio dell'addizionalità degli investimenti è un importante aspetto da tenere in considerazione quando si creano meccanismi di remunerazione dei gestori forestali. Perché si tratti di investimenti compensativi volti effettivamente a migliorare le condizioni climatiche, le attività realizzate devono, infatti, essere caratterizzate da una intenzionalità esplicita: non avrebbe senso, ad esempio, acquisire crediti di carbonio provenienti da un foresta già in fase di abbandono, il cui *stock* aumenta indipendentemente dalla realizzazione di un investimento esplicito di gestione forestale. Se il gestore forestale deve essere premiato, ciò va fatto commisurando il premio alle attività addizionali rispetto allo scenario delle condizioni ordinarie di gestione (lo scenario "*business as usual*"). Questo vincolo, se vale per i singoli interventi (il livello "micro") che entrano nel mercato dei crediti, dovrebbe valere anche nelle condizioni "macro" legate al conteggio del *sink* nelle politiche nazionali di riduzioni delle emissioni, ma questo è un tema ancora abbastanza controverso⁶.

Il "*leakage*" è invece quel fenomeno per cui un progetto comporta benefici in termini di C-*sink* all'interno dei confini del progetto stesso, ma può comportare effetti sociali, ambientali o economici opposti al suo esterno, problema frequente nei paesi in via di sviluppo. Si pensi ad esempio a casi di leakage legati alla dinamica della domanda ed offerta di prodotti legnosi, per cui se in una determinata regione forestale vengono attuate delle misure di conservazione forestale (con incremento del *sink* di carbonio), la domanda di legno si sposta in un'altra regione riportando la situazione, in un bilancio globale, al punto di partenza.

⁶ In effetti il Governo italiano nei propri bilanci per la rendicontazione del Protocollo di Kyoto dà grande rilievo al ruolo di C *sink* delle foreste in fase di abbandono gestionale.

Alla luce di queste considerazioni nei paragrafi successivi sono descritte alcune iniziative avviate in diverse regioni italiane che hanno tra le proprie esternalità positive la fissazione del carbonio atmosferico. Sono anche illustrati alcuni interventi di C-sink applicabili a scala nazionale quali: la creazione di boschi permanenti, l'arboricoltura da legno, la coltivazione del pino a turno breve e brevissimo (*short rotation forestry/coppice*).

9.3 I C-sink nell'ambito di alcune grandi iniziative regionali

9.3.1 Le misure forestali dei Piani di Sviluppo Rurale

La politica agricola costituisce uno tra i principali settori d'azione dell'Unione Europea (UE). Oltre alla creazione di un mercato comune dei prodotti agricoli, la Politica Agricola Comunitaria (PAC) prevede anche una serie di aiuti per il settore forestale. A partire dal 1992, attraverso successive fasi di programmazione, l'UE ha finanziato nell'ambito della riforma della PAC interventi di afforestazione e riforestazione che hanno effetti diretti anche sul ruolo delle foreste come serbatoi di carbonio.

Lo strumento di programmazione fondamentale per incentivare, su fondi dell'UE, dello Stato e delle Regioni, gli interventi forestali sono i cosiddetti Piani di Sviluppo Rurale (PSR) (Sotte, 2009). Questi si configurano come strumenti d'azione attraverso cui i Paesi membri della CE, a livello statale o regionale, possono intervenire con contributi pubblici nel settore primario.

Di recente avvio sono i PSR 2007-2013 adottati dalle Regioni ai sensi del Reg. (CE) 1698/05. Lo stesso regolamento comunitario pone un esplicito riferimento al problema del cambiamento climatico: *“Ai fini della protezione dell'ambiente, della prevenzione degli incendi e delle calamità naturali e dell'attenuazione del cambiamento climatico, occorre estendere e migliorare la massa forestale mediante l'imboschimento di superfici agricole o di altre superfici”* (CEE, 2005 – punto 38). Da ciò deriva che il ruolo potenziale delle foreste come serbatoi di carbonio è quindi espressamente riconosciuto anche dai Piani di Sviluppo Rurale attraverso una serie di opzioni di intervento che prevedono per lo più la realizzazione di nuovi boschi in pianura, interventi di miglioramento forestale e di prevenzione degli incendi boschivi.

9. Gli interventi di gestione forestale che possono mitigare il cambiamento climatico

I Piani di sviluppo rurale sono finanziati dal nuovo Fondo Europeo Agricolo per lo Sviluppo Rurale (FEASR) e si articolano in 4 campi di intervento, denominati assi; all'interno di ciascun asse il settore forestale è trattato in modo indipendente rispetto a quello agricolo assorbendo circa 14% delle risorse complessive destinate ai PSR.

Gli assi si articolano in specifiche linee d'azione denominate misure che prevedono interventi a marcato carattere multifunzionale tra i quali anche i benefici nel sequestro di gas-serra dall'atmosfera; nella figura seguente sono riportate alcune delle misure che contribuiscono alla fissazione delle CO₂ nei tessuti legnosi e nella conservazione di formazioni vegetali esistenti.

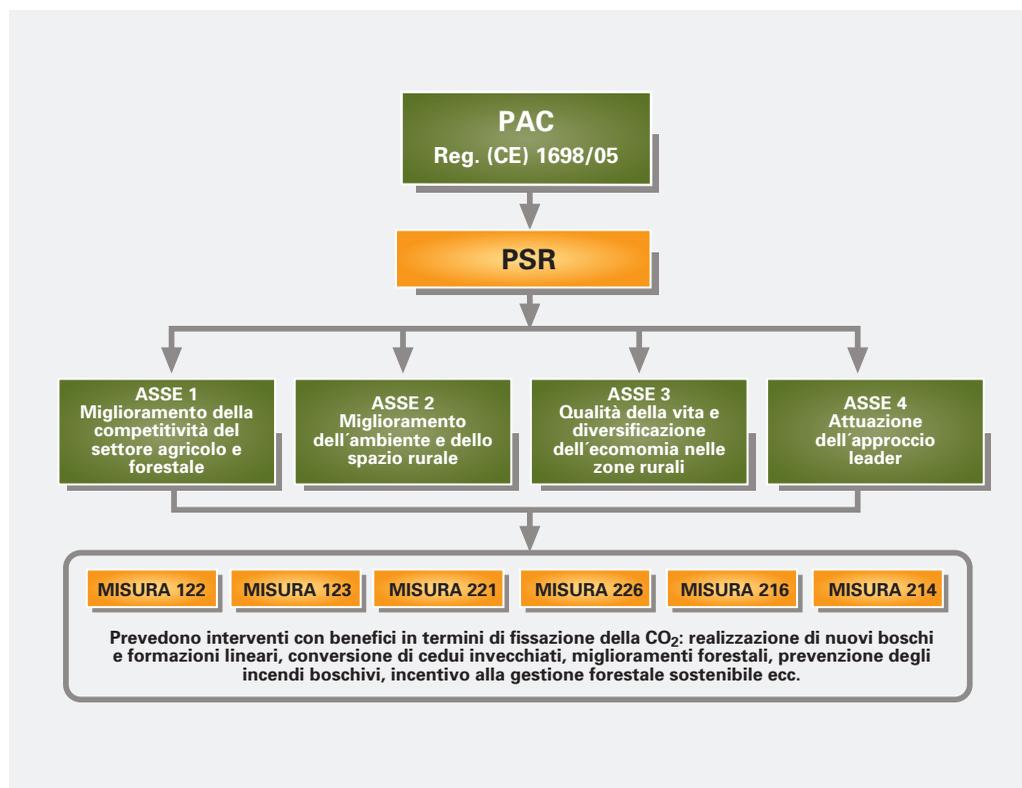


Figura 9.3 Assi e misure del Piano di Sviluppo Rurale.

9.3.2 Il Progetto nuovi boschi e sistemi verdi della Regione Lombardia

Oltre alle misure previste dai regolamenti comunitari vi sono anche alcune recenti iniziative regionali, strategiche in campo forestale come il piano pluriennale della Regione Lombardia denominato “10 grandi foreste per la pianura” che ha portato alla realizzazione di più di 400 ha di nuovo bosco; il progetto è stato successivamente riformulato e riproposto con la denominazione “10.000 ha di nuovi sistemi verdi” (Regione Lombardia, 2009).

Obiettivo generale del progetto è quello di trasformare vaste aree del territorio regionale lombardo in un nuovo sistema agroforestale multifunzionale, che possa quindi svolgere contemporaneamente funzioni ambientali, paesistiche, produttive, ecosistemiche, di fruibilità collettiva, energetiche, culturali e occupazionali. A questo riguardo è bene notare che, mentre nell’ambito degli interventi di afforestazione e riforestazione realizzati con le programmazioni comunitarie la fissazione del C è per lo più considerata alla stregua di una funzione secondaria dell’impianto, destinato principalmente alla produzione di legno, per quanto riguarda invece l’insieme delle finalità attribuite ai nuovi sistemi verdi, il C-*sink* non è più da considerarsi come addizionale, ma come una finalità primaria espressamente dichiarata.

Il piano, nel suo insieme, porterà alla realizzazione di almeno dieci nuove foreste (in parte già realizzate) permanenti in aree planiziali o di fondovalle attraverso la messa a dimora di nuovi boschi planiziali, fasce tampone, siepi e filari; si propone inoltre interventi di forestazione urbana e di fitodepurazione.

9.4 Esempi di interventi di C-*sink* in campo forestale

Relativamente al settore agro-forestale è possibile attuare tre grandi strategie per la riduzione della CO₂ in atmosfera agendo sia al livello di *source* che di *sink*:

1. preservare lo *stock* di carbonio riducendo la deforestazione e gli incendi (*source*);
2. aumentare lo *stock* di carbonio attraverso la realizzazione di piantagioni forestali e l’implementazione di pratiche che favoriscano la permanenza del carbonio nelle piante e nei suoli (*sink*);
3. utilizzare la biomassa come surrogato energetico al posto dei più tradizionali combustibili fossili (*source*).

9. Gli interventi di gestione forestale che possono mitigare il cambiamento climatico

Per quanto riguarda la funzione di *C-sink* la quantità di C fissato rimane comunque in funzione dalla quantità di biomassa presente per unità di superficie ed in particolare di tutte le variabili che condizionano la crescita delle piante e soprattutto del tipo di impianti che viene realizzato. Più lungo sarà il tempo in cui gli alberi permangono in situ e più lunga sarà la durata del sequestro del carbonio. Naturalmente la velocità di ritorno in atmosfera di questo carbonio dipende anche dalla destinazione d'uso del prodotto ricavato.

Formazione forestale	Durata del ciclo (anni)
Fustaia	Oltre 100
Ceduo	10-25
Arboricoltura da legno: -ciclo breve (es. pioppeto) -ciclo medio-lungo (es. noceto)	8-10 30-60
Short Rotation Coppices (o Short Rotation Forestry)	1-4

Tabella 9.1 Durata del ciclo di vita dei principali tipi di formazioni forestali.

Fonte: IREER, 2007

In questo contesto è possibile individuare una serie di esempi in campo agro-forestale legati all'afforestazione, alla riforestazione, alla gestione forestale e alla gestione delle coltivazioni in grado incrementare lo *stock* di C. Nella seguente tabella sono comparati in forma sintetica i benefici in termini di CO₂ sequestrata ed immagazzinata di quattro serbatoi di carbonio forestali dettagliati nei paragrafi successivi.

	Bosco permanente	Arboreto a ciclo lungo	Pioppeto	Forestry
				
C stock nel suolo	Significativo dopo alcuni anni dalla conversione dal suolo agrario; in crescita progressiva per molti anni	Abbastanza limitato e con livelli massimi ottimali non elevati	Abbastanza limitato e con livelli massimi ottimali non elevati	Limitato (rischi di riduzione se non vengono rispettate delle BP)
C stock nella biomassa epigea	Molto elevato, ma con incrementi annui relativamente contenuti	Relativamente elevato, con livelli di incremento significativi per un periodo non particolarmente lungo(30 anni in media)	Relativamente elevato, con livelli di incremento significativi per un periodo non particolarmente lungo (10 anni in media)	Non particolarmente elevato, ma con livelli di incremento molto significativi per un periodo estremamente ridotto
C stock nei prodotti legnosi	Abbastanza significativo in quanto il prodotto principale (legna da sega) è caratterizzato da cicli di vita lunghi, ma la produzione avviene con turni molto ampi	Molto significativo in quanto il prodotto principale (compensato) è caratterizzato da cicli di vita relativamente lunghi e la produzione di tronchi avviene su cicli che si ripetono a brevefrequenza	Molto significativo in quanto il prodotto principale (compensato) è caratterizzato da cicli di vita relativamente lunghi e la produzione di tronchi avviene su cicli che si ripetono a breve frequenza	Non particolarmente significativo in quanto le due destinazioni principali non energetiche (pannelli e paste ad usocartario) sono caratterizzate da cicli di vita abbastanza brevi
C stock fossile evitato grazie ad impieghi energetici	Può essere di un certo valore soprattutto negli interventi colturali, anche questi sono di norma molto distribuiti nel tempo	Può essere di un certo rilievo se l'impianto prevede l'utilizzo di specie accessorie utilizzabili per la produzione di biomassa a fini energetici	Molto limitato, dal momento che la produzione di sottoprodotto impiegabili a fini energetici è ridotta	Se l'impianto è destinato a fini energetici può essere molto significativo

Tabella 9.2 Caratteristiche degli stock di carbonio collegati alla realizzazione di tre tipologie di impianti forestali.

9.4.1 Il bosco permanente

Il bosco permanente è un impianto naturaliforme con latifoglie autoctone misto arboreo ed arbustivo con disposizione delle piantine generalmente mescolata e casuale; caratteristica principale è quella di essere una formazione destinata a permanere nel tempo a spiccato carattere multifunzionale (funzione produttiva, ricreativa, protettiva, ambientale ecc.).

Questo tipo di impianto permette un buon assorbimento di carbonio sia per quanto riguarda la biomassa epigea che lo *stock* accumulato nel suolo (Poulton, 2003). Considerata la crescita relativamente lenta di queste formazioni anche la velocità di accumulo della CO₂ nel terreno e nei tessuti vegetali risulta modesta rispetto ad altre formazioni come ad esempio il pioppeto.

Il vincolo forestale permanente, molto spesso attribuito agli interventi di riforestazione, prevede che questi vengano considerati come un bosco a tutti gli effetti dal momento dell'attecchimento delle piantine, ciò permette di avere una certa garanzia della continuità della funzione di C- *sink* ad essi legata.

Il quantitativo di CO₂ immagazzinata ettaro/anno, come descritto in precedenza risulta in funzione di diversi fattori come le condizioni climatiche, le caratteristiche progettuali (le specie utilizzate, le densità d'impianto), gli interventi selvicolturali previsti (diradamenti, tagli colturali ecc.), l'età e lo stato fitosanitario del popolamento. Si stima che un bosco permanente realizzato alle nostre latitudini nel complesso possa immagazzinare annualmente da 5 a 15 t CO₂ ha⁻¹ anno⁻¹ a seconda dei pool-considerati (suolo, fusto, radici, rami e foglie) dell'età del popolamento e delle condizioni climatiche in cui si trova, (Poulton *et al.* 2003, Vesterdal *et al.* 2003 Magnani *et al.* 2005, Alberti *et al.* 2006.)

In prima approssimazione, la scelta di realizzare un impianto di tipo naturaliforme rappresenta di per sé una garanzia di durata del popolamento che contribuirà certamente alla costituzione di *sink* interessanti e *stock* a lungo indisturbati.

La realizzazione di un bosco permanente risulta quindi in completo accordo con i requisiti posti dal Protocollo di Kyoto; infatti, entrambe le condizioni "intenzionalità" e "permanenza" sono soddisfatte. In particolare se si considera l'opzione (A+R)-D (cfr. cap. 5) si evidenzia un ruolo attivo dell'intervento alla voce "A – afforestazione", consolidato e garantito nel tempo dal vincolo forestale permanente.

Analoga considerazione può essere fatta se si prendono in considerazione i benefici apportati dalla gestione forestale di tali impianti; infatti, una conduzione volta a favorire lo stoccaggio del C nel tempo può concorrere in modo efficace al raggiungimento degli obiettivi del PK.

La funzione di C *sink* complessiva dell'impianto può essere incrementata dall'implementazione di alcune buone pratiche. Se da un lato lo stock di carbonio è strettamente legato alla biomassa epigea ed ipogea presente, questo dipende anche dalle modalità di gestione della piantagione che direttamente o indirettamente vanno ad agire su tali componenti. A ciò si aggiunge che pratiche quali la riduzione delle lavorazioni al suolo, il ritorno al suolo della biomassa derivante da interventi intercalari (sfolli, pulizie, diradamenti), il miglioramento della struttura del terreno ecc. permettono un maggior sequestro di carbonio da parte del suolo forestale.

9.4.2 L'arboreto a ciclo medio-lungo

Si tratta di un impianto artificiale plurispecifico con latifoglie di pregio destinato alla produzione di assortimenti da opera; presenta caratteristiche più intensive rispetto al bosco naturale dettato dalla finalità industriale del legname ricavato a fine ciclo. Il sesto d'impianto è regolare ed i soggetti arborei sono sottoposti a periodici interventi di potatura e di lavorazioni al suolo.

Il ciclo di vita o turno delle specie principali non inferiore a 30 anni (dipende dalle specie utilizzate, dalle condizioni di fertilità, dalle tecniche e dagli assortimenti che si vogliono privilegiare), le specie accessorie finalizzate a garantire il corretto accrescimento delle principali verranno utilizzate a fini energetici prima della fine del ciclo produttivo.

Stando ad una definizione strettamente teorica per arboricoltura da legno si intende quella scienza applicata che si occupa della coltivazione temporanea di singoli alberi o di un insieme di alberi al fine di produrre legno con specifiche caratteristiche (Mori, 1996). Alla luce di quanto affermato si comprende come nell'ampio contesto dell'arboricoltura possano essere realizzati innumerevoli varietà di impianti, con altrettante specifiche progettuali e di gestione. La scelta delle specie, la densità d'impianto, la cadenza dei diradamenti, le lavorazioni al suolo sono tutti fattori che incidono sul bilancio complessivo del C fissato in questi impianti. Le deposizioni atmosferiche azotate (abbastanza elevate in alcune zone della pianura lombarda), come anche la fertilità residua su suoli ex agricoli (almeno nei primi anni di impianto) sono variabili che possono influire in diversa misura sugli accrescimenti delle piantagioni forestali.

Sulla base di un'attenta valutazione dei dati riportati a livello nazionale ed europeo il potenziale di fissazione di un impianto da arboricoltura presenta una variabilità molto ampia, tuttavia lo si può assimilare a quello di un rimboschimento naturaliforme precedentemente descritto almeno nei primi decenni d'impianto. Infatti, se da un lato un arboreto presenta una minore densità di impianto, un minor apporto di carbonio

9. Gli interventi di gestione forestale che possono mitigare il cambiamento climatico

alla lettiera e di conseguenza anche un più contenuto stoccaggio nel suolo, la scelta di specie a rapido accrescimento, le fertilizzazioni, una gestione volta a massimizzare gli incrementi legnosi portano ad ipotizzare valori di C-*sink* ha⁻¹ anno⁻¹ simili per le due tipologie di impianto compresi tra i 5 e 15 t CO₂ ha⁻¹ anno⁻¹.

L'arboricoltura rientra a tutti gli effetti nella definizione di foresta assunta dal PK. Stando invece a quella data da diverse normative presenti a livello regionale l'arboricoltura da legno non è considerata in questa categoria. Da ciò consegue che su tali impianti non sussiste alcun vincolo di tipo forestale (destinazione d'uso a fine turno) e quindi alcun obbligo di compensazione nel momento in cui vengano riconvertiti a coltura agricola.

Questo non esclude la compatibilità di tali formazioni con il principio della permanenza (*Once Kyoto Land, Always Kyoto Land*) e con i requisiti posti dal PK; tuttavia se si considera il bilancio (A+R)-D si ha un peso positivo sulle emissioni quando l'impianto è in essere, un peso negativo quando viene tagliato.

Considerato un ciclo medio compreso tra i 30-50 anni gli impianti realizzati dopo il 1990 saranno sicuramente (a meno di eventi calamitosi non prevedibili) dei *sink* per il *first commitment period* e per alcuni anni ancora; successivamente, una volta riconvertiti, saranno computati come fonte diretta di emissione. In linea generale, affidarsi in modo incondizionato a tali impianti può portare a reali vantaggi nel presente, ma anche a possibili incertezze nel futuro. A ciò si aggiunge che, allo stato attuale, prerogativa indispensabile alla realizzazione di un arboreto è la presenza di finanziamenti ad hoc e non si ha alcuna garanzia che tali incentivi continuino anche in futuro.

In questo contesto le condizioni che garantirebbero un ruolo positivo dell'arboricoltura da legno nel "panorama Kyoto" sono:

- la presenza di un impegno formale da parte dei soggetti realizzatori dell'impianto ad una sostituzione dello stesso al termine del ciclo produttivo ed eventualmente anche in seguito al verificarsi di eventi calamitosi che ne compromettano la funzione di *sink* ;
- la predisposizione di finanziamenti mirati a mantenere i serbatoi di C costituiti da impianti a ciclo medio-lungo attraverso un aiuto per il loro reimpianto e/o sostituzione.

In questo tipo di formazioni si prevedono lavorazioni al suolo fino a circa il quinto anno di età al fine di limitare la concorrenza della componente erbacea con le specie di pregio; soluzione interessante è l'impiego nell'interfila di specie arbustive azotofissatrici con duplice funzione: apporto di nutrienti al terreno e conseguente astensione dallo sfalcio nell'interfila e funzione di *sink* operata da queste stesse piante. Perché gli impianti massimizzino la fissazione della CO₂ e l'immagazzinamento nel tempo della stessa è opportuno che in ogni impianto si

impieghino due serie di specie: una secondaria a rapido accrescimento, con alti tassi di assorbimento e bassa capacità di immagazzinamento, ed una principale con una crescita contenuta, ma in grado di avere un'elevata capacità di stoccaggio di carbonio nel tempo.

9.4.3 Il pioppeto

Queste formazioni, in cui le uniche piante impiegate sono diversi cloni appartenenti al genere *Populus*, sono per lo più realizzate artificialmente su ex-coltivi agrari o nelle aree di golena della pianura padana. I pioppeti sono caratterizzati da una gestione piuttosto intensiva sia per quanto riguarda le lavorazioni al suolo che l'utilizzo di fertilizzanti ed antiparassitari se paragonata ad altre forme di arboricoltura da legno. Il ciclo produttivo di un pioppeto è di circa 10-11 anni con incrementi annui in termini di biomassa epigea molto elevati per le produzioni di legname da sfoglia (da impiegare nella produzione del compensato).

I pioppeti presentano incrementi medi annui molto elevati con un contestuale rapido accumulo di biomassa epigea; si stima che un pioppeto possa arrivare a fissare nel suo complesso fino 18 t CO₂ ha anno⁻¹.

Ai fini della compatibilità con i requisiti posti dal PK è opportuno ricordare che la pioppicoltura non rientra nella categoria “*forest land*”, ma in quella “*cropland*” (cfr. par. 5.1.1.). La coltivazione del pioppo non può di conseguenza essere considerata nell'ambito delle ARD nonostante una funzione di C-*sink* tutt'altro che irrilevante. In sede di negoziato internazionale l'Italia ha inoltre escluso il “*cropland management*” quale attività addizionale e quindi lo *stock* di C presente nei pioppeti non può essere computato ai fini della riduzione delle emissioni prevista dal PK.

La pioppicoltura applicata al contesto italiano prevede scelte gestionali che limitano soprattutto il *pool* di carbonio del suolo. A questo riguardo una riduzione delle lavorazioni (erpatura e fresatura) oltre il quinto anno di età dell'impianto sono soluzioni in grado di incrementare lo *stock* di C ipogeo. L'inerbimento delle interfile unitamente alla cippatura in loco del materiale di risulta derivante dalle operazioni di potatura concorrono in modo determinante alla fissazione della CO₂ da parte di un pioppeto.

Allo stato attuale, come già accennato in precedenza, non esiste un codice di buona condotta *ad hoc* per la funzione di C-*sink* in agricoltura o in selvicoltura. Tuttavia il rispetto di alcune indicazioni inserite in un più ampio contesto di gestione sostenibile come quello proposto negli standard di certificazione FSC e PEFC per la gestione delle piantagioni forestali può portare riflessi positivi anche nel contesto specifico della fissazione della CO₂ atmosferica.

9.4.4 La *Short Rotation Forestry/Coppice*

Per *Short Rotation Forestry/Coppice* si intende la coltivazione in impianti specializzati di specie arboree a rapido accrescimento come il Pioppo ed il Salice, ma anche la Robinia, l'Ontano e l'Eucalipto. Queste piantagioni sono caratterizzate da un'elevata densità di impianto (anche 10-15.000 piante/ettaro) e vengono utilizzate ogni (1-6 anni) con tecniche molto simili a quelle delle tradizionali colture agrarie.

Questo tipo di coltivazioni può arrivare a produrre più 4 tonnellate di biomassa ettaro/anno con un contributo in termini di CO₂ fissata fino a 27 t CO₂ all'anno per ettaro (Zenone *et al.*, 2007).

In linea generale si può affermare che il contributo delle short rotation forestry al ciclo del carbonio non si gioca tanto preservando un certo stock di CO₂ nel tempo quanto piuttosto nell'impiego della biomassa ricavata come surrogato dei tradizionali combustibili fossili, comportando un minor apporto di carbonio in atmosfera.

Secondo Burschel *et al.* (1993) l'effetto di surrogazione energetica derivato dall'impiego combustibile di 1 kg di legno anidro, evita l'emissione di 0,26 kg di carbonio derivante dalla combustione di gasolio leggero. Inoltre l'impiego del legno quale materiale da costruzione riduce il consumo di vettori fossili o la produzione di CO₂ ad essi legata.



Figura 9.4 Impianto di pioppi in Finlandia.

Stando ad alcune stime riportate in una pubblicazione dell'ufficio federale dell'ambiente elvetico (UFAM, 2006) l'impiego di un m³ di legno in sostituzione di materie prime o materiali da costruzione convenzionali, compreso l'uso energetico degli scarti o del legno usato evita l'emissione in atmosfera di una t di CO₂.

Per quanto riguarda la compatibilità con i requisiti imposti dal PK si può fare un discorso analogo ai pioppeti in quanto le colture a rapido accrescimento rientrano nella categoria “*cropland*” e in Italia non possono essere considerate al fine del raggiungimento degli obiettivi posti da Kyoto.

Tali misure devono essere per lo più orientata a preservare la CO₂ nel comparto suolo unico *pool* che ha una relativa durata nel tempo in questo tipo di impianto. A questo riguardo si potrebbero evitare le lavorazioni al suolo nell'interfila e l'utilizzo di macchinari atti ad evitare il costipamento del terreno.

9.4.5 Interventi di gestione forestale

In linea generale qualsiasi indirizzo di gestione di un bosco che tenda a massimizzare la produzione legnosa porta ad un incremento della CO₂ fissata. Pur essendo stata esaminata la questione nei suoi lineamenti principali nel capitolo 8, più di dettaglio, è possibile individuare alcune soluzioni di gestione forestale volte ad incrementare lo stock di carbonio presente nell'ecosistema foresta:

- allungamento dei turni, ovvero del lasso di tempo che intercorre tra due tagli di utilizzazione nella stessa superficie boschiva, che permette un maggior permanenza dello *stock* di C nel tempo;
- analogo allungamento del periodo che intercorre tra i tagli intercalari (diradamenti);
- preferenza della cippatura o dell'accatastamento in loco del materiale di risulta in alternativa alla sua combustione (quest'ultima soluzione, implica la re-immissione diretta in atmosfera della CO₂ precedentemente fissata);
- conversione dei cedui all'alto fusto: questa forma di governo infatti è caratterizzata da valori provvigionali (massa per unità di superficie) più elevati rispetto alla gestione a ceduo.
- scelta di una selvicoltura di qualità volta ad ottenere come assortimento finale legname da opera che consente un prolungarsi nel tempo della funzione di *C-sink* del prodotto legnoso rispetto alla produzione di legna da ardere. I benefici ambientali della legna da ardere non sono però trascurabili se utilizzata come surrogato energetico dei tradizionali combustibili fossili.

9. Gli interventi di gestione forestale che possono mitigare il cambiamento climatico

Come per gli interventi di riforestazione e afforestazione nell'ambito del Protocollo di Kyoto non esistono finanziamenti mirati, ma il sostegno passa sempre attraverso gli strumenti convenzionali di aiuto economico per le imprese e le aziende agricole. Ciò testimonia, come allo stato attuale, a livello nazionale e regionale, la funzione di *C-sink* sia considerata ancora solo come un'esternalità positiva derivante dal finanziamento di altre attività nel settore primario e non come una priorità oggetto di un sostegno ad hoc.

9.4.6 Il fenomeno dell'espansione naturale del bosco

Negli ultimi decenni, a seguito dell'abbandono di prati e pascoli soprattutto in zone montane, si sono verificati in tutto l'arco alpino estesi fenomeni di espansione naturale del bosco su ex-coltivi, con conseguente incremento del quantitativo di carbonio fissato nella biomassa arborea (Corona *et al.*, 2005).

La determinazione di un valore medio di assorbimento di C per i boschi di neoformazione è quanto mai problematica pur essendo di portata tutt'altro che trascurabile. L'effettivo assorbimento di CO₂ di tali formazioni è chiaramente legato al tipo di processo in atto e al tipo di cenosi forestali coinvolte. Alcuni studi condotti in Veneto hanno assunto come valore di massima per questo processo di ricolonizzazione spontanea del pascolo da parte del bosco quello di 2,52 t CO₂ per ettaro per anno relativamente alla sola biomassa epigea (Anfodillo *et al.* 2007).



Figura 9.5 Impianto di *Criptomeria japonica* a servizio delle esigenze di un villaggio sulle pendici del Monte Emei (Cina).

Trattandosi di un fenomeno di per sé naturale, non legato ad interventi antropici diretti, il beneficio in termini di C-*sink* risulta pressoché a costo zero. Per quanto riguarda invece la compatibilità con i requisiti del PK, l'Italia considera queste neoformazioni come “gestite”⁷, implicando così il soddisfacimento del principio del *direct human induced*. Più precisamente secondo alcune valutazioni nazionali a tali formazioni si attribuisce un potenziale di assorbimento molto elevato pari a 3 Mt CO₂ (delibera CIPE 123/2002) (cfr. capitolo 4). Da un punto di vista prettamente formale poco si può eccepire sul conteggio al fine del Protocollo di Kyoto delle nuove superfici forestali derivanti da processi di ricolonizzazione naturale del bosco. Tuttavia appare evidente che il conteggio dei processi naturali di espansione del bosco, solo indirettamente dovuti ad un'azione antropica, possono portare ad una cospicua generazione di *ineffective credits*. Occorre tuttavia osservare che l'espansione naturale del bosco soprattutto a quote più elevate è di per sé una conseguenza diretta del cambiamento climatico in atto. Il fenomeno del *global warming* fa sì che alcune specie trovino condizioni ambientali idonee anche a quote superiori alzando così il limite del bosco. A questo punto ci si interroga se sia legittimo conteggiare nella lotta al cambiamento climatico le conseguenze stesse del fenomeno che si cerca di contrastare.

9.5 Conclusioni

In linea generale si può affermare che ogni iniziativa di gestione sostenibile del patrimonio forestale concorre a incrementare o almeno a stabilizzare la funzione di C-*sink* dei sistemi forestali. Infatti, l'idea stessa di gestione forestale sostenibile implica una gestione consapevole delle foreste che ne limita lo sfruttamento eccessivo, garantendo così la conservazione di un certo stock di carbonio nel tempo. Ciò tuttavia non può prescindere dalle caratteristiche dell'intervento e dal contesto economico, sociale ed ambientale in cui è realizzato. Infatti, la realizzazione di nuovi serbatoi forestali di carbonio o la lotta alla degradazione e alla deforestazione hanno un senso – e una maggior convenienza economica – in ragione della multifunzionalità di questo tipo di interventi.

Nella consapevolezza che la riduzione delle emissioni in atmosfera può avvenire innanzitutto attraverso la realizzazione di nuovi modelli di consumo energetico, anche interventi nel settore forestale a scala nazionale e regionale possono dare il loro contributo; soprattutto se questi acquistano una dimensione multifunzionale.

⁷ *Le Good Practice Guidance for LULUCF definiscono come gestione forestale “il processo di pianificazione e di implementazione di pratiche per l'amministrazione e l'uso delle foreste con lo scopo di rispettare appieno le rilevanti funzioni ecologiche, economiche e sociali della foresta. Una foresta gestita è una foresta soggetta a gestione forestale”.*

9. Gli interventi di gestione forestale che possono mitigare il cambiamento climatico

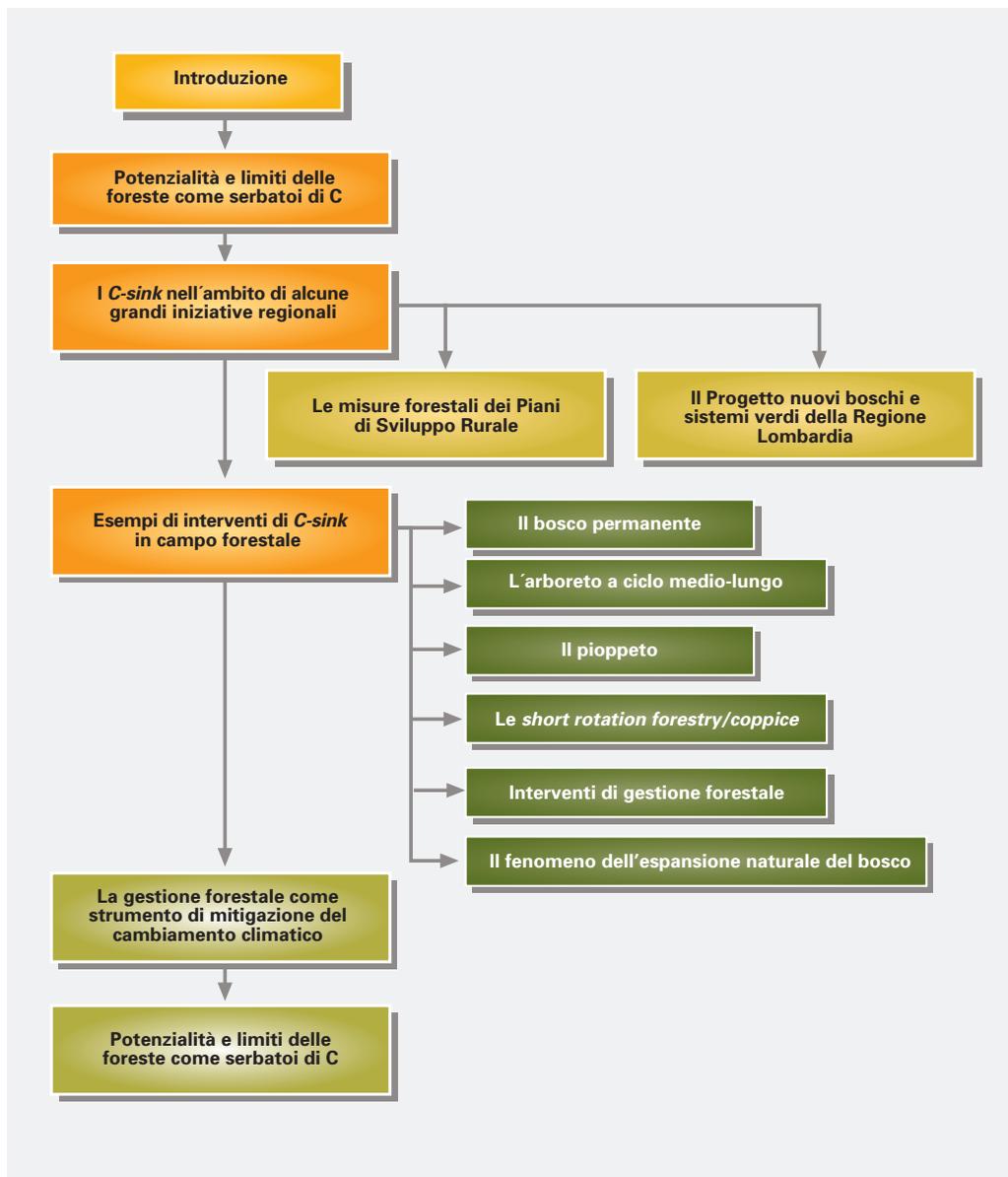


Figura 9.6 Schema sinottico sugli interventi di gestione forestale atti alla mitigazione dei cambiamenti climatici.

Infatti, se il beneficio apportato non si limita soltanto alla funzione di *C-sink* del nuovo bosco, ma anche ad esempio alla funzione paesaggistica, sociale, protettiva, produttiva, idrogeologica, questi interventi trovano una loro sostenibilità economica e possono trovare spazio all'interno di diverse iniziative di finanziamento pubblico. Ne sono un esempio i Piani di Sviluppo rurale avviati a livello regionale che prevedono interventi di afforestazione e riforestazione e di conservazione degli stock di carbonio esistenti con un incremento diretto sulla fissazione della CO₂ atmosferica.

Se indubbio è il ruolo delle foreste nella mitigazione del cambiamento climatico tuttavia queste rappresentano dei pozzi di C relativamente vulnerabili e mutabili nel tempo perché soggetti ad una serie di interventi esterni come incendi, utilizzazioni antropiche che possono riportare la CO₂ precedentemente fissata in atmosferica.



Figura 9.7 Rimboschimento di Pino nero (Toscana).



10

Primo contributo sulla capacità di accumulo del carbonio nei rimboschimenti di Pino d'Aleppo in Puglia

**Paola Mairota, Dario De Filippis,
Giovanni Notarnicola, Vincenzo Leronni,
Francesco Minunno.**

10.1 Introduzione

A livello internazionale si stanno effettuando numerose ricerche sulla capacità di assorbimento di anidride carbonica da parte del suolo e della vegetazione (Verwijst e Telenius, 1999; Spechta e Westa, 2003; Coomes *et al.*, 2002). In Italia risulta esserci un certo numero di ricerche in merito, in gran parte relative all'analisi della produzione e della quantificazione della biomassa da utilizzare a scopi energetici (Scarascia-Mugnozza *et al.*, 2000; Calfapietra *et al.* 2003; Maetzke e La Mantia, 2007), oppure ai sistemi e alle procedure di quantificazione dei flussi e degli *stock* di carbonio. Inoltre, è bene evidenziare come la gran parte degli studi effettuati a livello nazionale sul *carbon stocking* sono stati indirizzati alle fitocenosi prevalentemente arboree forestali oppure alle colture di prevalente interesse agricolo (ad esempio, in ambiente mediterraneo in oliveti e pescheti: in Sofo *et al.*, 2005).

Gli studi condotti sulla funzionalità di vegetazioni erbacee e/o arbustive, prevalentemente degli anni 1970-80, hanno riguardato sistemi ecologici, differenti fra loro, pur se fisionomicamente caratterizzabili come formazioni a prevalenza di

sclerofille sempreverdi, come *chaparral* e *fynbos*, (e.g., Kummerov *et al.* 1977; Kummerov e Mangan, 1980; Mooney e Parson 1973; Higgins *et al.* 1987), e hanno portato a risultati caratterizzati da una grande variabilità che non permette generalizzazioni. Più recentemente alcune ricerche scientifiche sono state più strettamente riferite alle formazioni della macchia mediterranea (Costa e La Mantia, 2005; oppure, a livello internazionale sia in ambiente mediterraneo: in Israele Sternberg e Shoshany, 2001 e in Spagna Casado *et al.*, 2004; sia transoceanico: in Argentina Navarro Cerrillo & Blanco Oyonarte, 2006, in Mongolia Jin *et al.*, 2007).

Analogamente, gli studi sulla funzionalità (carbon and water exchange) delle formazioni derivanti da successioni secondarie sono stati prevalentemente riferiti a quelle del bioma della foresta temperata (Hooker e Compton, 2003; Houghton e Goodale, 2004; Monser *et al.* 2003, Schlesinger, 1990; Alberti *et al.* 2008), mentre risultano ancora poco conosciute implicazioni funzionali delle dinamiche di successione secondaria in ambiente mediterraneo, con particolare riferimento a quelle silvogenetiche dei rimboschimenti di pini mediterranei realizzati a vario scopo sin dagli anni 30 in molte regioni meridionali italiane.

Pertanto lo studio considera quali formazioni forestali minori quelle dei rimboschimenti di Pino d'Aleppo, anche in considerazione:

- della loro elevata valenza ai fini della conservazione della diversità biologica e della qualità ambientale (prevenzione erosione del suolo su pendii acclivi; limitazione di erosione costiera; *source-sink* di biodiversità a ridosso delle conurbazioni, connettività del paesaggio per specie animali e vegetali);
- delle implicazioni per la gestione forestale finalizzata sia alla creazione di serbatoi di carbonio ed alla prevenzione degli incendi;
- della necessità di acquisire importanti informazioni per la tutela di ambiti territoriali particolari, al fine di limitare gli impatti antropici (molte aree, essendo improduttive per l'economia tradizionale, sono considerate, erroneamente, inutilizzabili).

Scopo dello studio ⁸ è stato quello di ottenere indicazioni preliminari circa le potenzialità di accumulo di carbonio da parte di queste formazioni forestali e, in particolare, utili ad una valutazione, in primissima approssimazione, delle differenze tra popolamenti diverso grado di densità, alcuni dei quali interessati da processi di rinaturalizzazione, rispetto alle capacità di accumulo del carbonio.

Il carattere del presente studio è da intendersi del tutto introduttivo rispetto alla

⁸ Lo studio è stato condotto sotto la responsabilità scientifica della Dr. Paola Mairota. I rilievi in bosco, le attività di determinazione della biomassa e parte delle elaborazioni sono state condotte dai dott. Dario De Filippis, Giovanni Notarnicola, Francesco Minunno e Vincenzo Leronni. Ad una parte dei rilievi in bosco ha partecipato anche il dott. Giovanni Discipio.

10. Primo contributo sulla capacità di accumulo del carbonio nei rimboschimenti di Pino d'Aleppo in Puglia

problematica indicata, dal momento che la numerosità campionaria è estremamente ridotta, sia per motivi di budget, sia in relazione alle scadenze contrattuali (sei mesi) che hanno imposto di condurre i rilevamenti in bosco nei mesi invernali, in condizioni meteorologiche avverse che, oltre a causare disagio per gli operatori, hanno determinato continui rinvii e ritardi.

10.2 Materiali e metodi

Sono stati individuati siti di studio in tre ambiti territoriali pugliesi caratterizzati sia dalla presenza di estesi rimboschimenti a prevalenza di Pino d'Aleppo (*Pinus halepensis* Miller) di circa 30 anni, sia dall'essere compresi in aree individuate come Zone di Protezione Speciale e/o Sito di Importanza Comunitaria, ai sensi della Direttiva 709/79 "Uccelli" e della Direttiva 43/92 "Habitat". Il sito scelto inizialmente per lo studio ricade nel SIC IT9110002 Valle Fortore Lago di Occhito, ed è localizzato su entrambi i versanti del lago artificiale, su terreni argillosi, in parte in Puglia e in parte in Molise (Fig. 10.1). Gli altri due siti, individuati in una fase successiva, ricadono nella ZPS e SIC IT 9120007 Murgia Alta, sono localizzati, su terra rossa, rispettivamente nei comuni amministrativi di Gioia del Colle (località Grotta Caprara) (Fig. 10.2) e Altamura (località Chinunno), quest'ultimo ricade anche nel perimetro del Parco Nazionale dell'Alta Murgia.

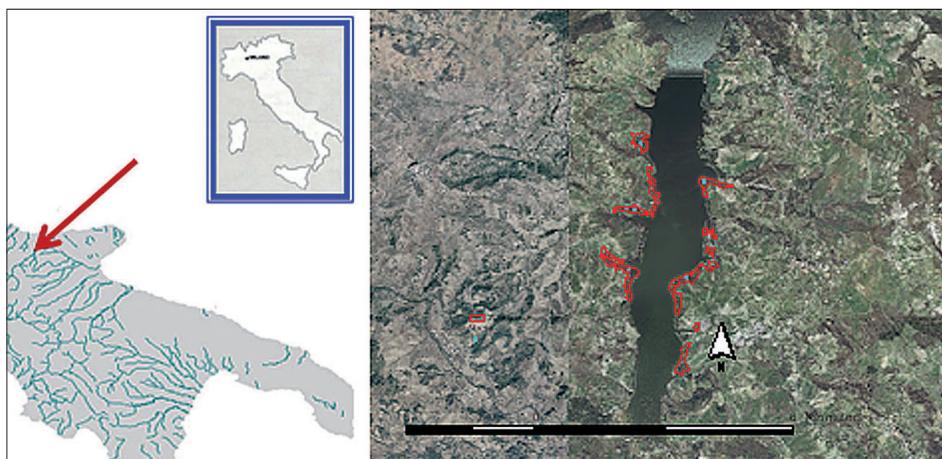


Figura 10.1 Localizzazione delle aree campione nel sito del Lago di Occhito (province di Foggia e di Campobasso).



Figura 10.2 Localizzazione dei siti di Gioia del Colle e di Altamura (provincia di Bari).



Figura 10.3 Sito di Gioia del Colle (provincia di Bari).

10. Primo contributo sulla capacità di accumulo del carbonio nei rimboschimenti di Pino d'Aleppo in Puglia

La inclusione in un secondo momento, nel presente studio, dei siti di Gioia del Colle e di Altamura è scaturita dalla opportunità di trarre vantaggio, nel primo caso, da un evento perturbativo causato dal vento che ha provocato lo sradicamento di un gran numero di individui di Pino d'Aleppo, con esposizione degli apparati radicali degli alberi (Fig. 10.3), e, nel secondo, dello svolgimento di interventi di diradamento boschivo nella pineta.

Nell'ambito della prima di tali aree di studio (Occhito) sono state istituite con criterio casuale 9 aree di saggio (1000 m²) per la caratterizzazione strutturale dei popolamenti arborei nelle quali sono stati eseguiti i rilievi dendrometrici per la costruzione delle curve ipsometriche necessarie alla individuazione degli alberi modello della biomassa arborea epigea.

Sul versante molisano del Lago di Occhito sono state quindi individuate due zone caratterizzate da popolamenti con evidente diversità di densità e in ciascuna di esse sono state istituite due aree di saggio (400 m²) nelle quali, oltre alla caratterizzazione strutturale e compositiva degli strati della vegetazione (arboreo, arbustivo, novellame) è stato testato un protocollo di rilievo finalizzato alla stima dello stock di carbonio nei comparti-serbatoio (pool) della biomassa epigea (biomassa vivente e necromassa della componente arborea), della biomassa (epigea e ipogea) del novellame, della lettiera e orizzonte organico e della biomassa ipogea (radici <1cm).

Per la caratterizzazione compositiva e strutturale della vegetazione, nell'area di saggio principale (20x20 m), per ogni pianta arborea si è individuata la specie e sono stati misurati i due diametri ortogonali a petto d'uomo e gli analoghi al colletto; per circa il 20% delle piante è stata misurata l'altezza totale. Nella stessa area, perpendicolarmente ad uno dei suoi lati sono stati istituiti due *line intercept transect* (Krebs 1999) della lunghezza di 20 m, a circa 7 e 14 m lungo lato considerato. Lungo tali transetti si è stimata la copertura arborea e quella arbustiva (specifico e totale) e, per la componente arbustiva è stata misurata anche l'altezza. Sono stati inoltre istituiti quattro *frame quadrats* (1x1 m), suddivisi in maglie di 0,01 m² per la stima di densità e frequenza (Bullock, 1996) del novellame delle specie arboree e arbustive in corrispondenza di due punti individuati a un terzo circa delle mediane. In particolare, per ogni maglia, sono stati individuati i semenzali presenti, riconosciuta la specie di appartenenza e misurata l'altezza e si è osservato quali semenzali avessero origine comune (micro ceppaie).

Relativamente alla stima della biomassa, si è proceduto ad indagini nei pool di carbonio indicati.

Per il pool della biomassa arborea epigea è stato abbattuto un albero per ciascuna area di saggio, per un totale di 4 alberi la cui posizione geografica è stata rilevata attraverso un navigatore GPS (Garmin eTrex Vista) con precisione di 6 metri. È stata seguita la metodologia proposta Scott e Reinhardt (2002). Successivamente alla sramatura, effettuata mediante impiego di una motosega e avendo cura di non spostare i rami dalla

originaria posizione lungo il fusto, utilizzando una rotella metrica, di ciascun albero è stata misurata in modo agevole l'altezza totale dell'albero, la profondità totale della chioma e quelle della chioma secca e verde, e, mediante cavalletto dendrometrico, ne sono stati misurati i due diametri ortogonali alla base e a 1,30 m.

Per stima della biomassa arborea epigea l'albero è stato suddiviso in 5 comparti principali: fusto, rami con diametro maggiore di 1 cm, rami con diametro uguale o inferiore a 1 cm, comprensivi delle foglie, chioma secca, strobili. Per ciascuno di questi comparti, mediante dinamometro (portata 40 kg, precisione 50 g), è stato determinato il peso umido in bosco e prelevati, pesati e riposti in involucri di pellicola impermeabile all'umidità, sigillati, campioni rappresentativi per la determinazione del peso anidro in laboratorio.

Per il fusto sono state prelevate cinque rotelle, due rispettivamente in corrispondenza del colletto e del diametro a 1,30, le altre a distanze uguali, dividendo il fusto in quattro parti e prelevando le tre sezioni interne al fusto (es. per un albero di altezza 16 metri, sono state prelevate tre rotelle ad altezza 4, 8, e 12 metri). Dalla chioma secca sono state prelevate tre porzioni da 1 kg. La chioma secca insieme ai rami verdi con diametro inferiore a 1 cm ed agli aghi costituisce *L'Available Canopy Fuel* (ACF, Scott e Reinhardt, 2002), e cioè la parte dell'albero che più rapidamente brucia durante l'avanzamento di un incendio di chioma.



Figura 10.4 Rimboschimento di Pino d'Aleppo in Puglia.

10. Primo contributo sulla capacità di accumulo del carbonio nei rimboschimenti di Pino d'Aleppo in Puglia

Dalla chioma verde sono stati prelevati alcuni rami ad altezza crescente (in media un ramo ogni 1- 1,5 metri di chioma verde lungo il fusto). Dalla chioma verde inoltre sono stati selezionati con una cesoia i rami con diametro maggiore di 1 cm e quelli con diametro inferiore o uguale ad 1 cm con i relativi aghi. Per i rami con diametro maggiore di 1 cm sono state prelevate tre porzioni da 1kg, mentre dai rami con diametro inferiore o uguale a 1cm è stato preparato il campione di ACF riferito alla sola chioma verde. Dalla chioma inoltre sono stati raccolti e pesati gli strobili.

Per la determinazione del peso anidro in laboratorio si è fatto riferimento al “metodo per pesata” UNI 9091/2, che rappresenta la norma di riferimento per la determinazione del tenore di umidità del legno. I campioni indicati sono stati sottoposti a pesatura con precisione dello 0,2% allo stato umido e ed allo stato anidro. Tale stato è stato ottenuto mediante essiccazione in stufa ventilata, a temperatura di $103 \pm 2^\circ \text{C}$, eseguendo controlli con successive pesate al momento della estrazione dalla stufa. I campioni si considerano completamente anidri quando la differenza delle masse, determinata in due pesate successive eseguite con un intervallo di tempo di 6 h, è minore dello 0,5 %. L'umidità media U dei campioni, si calcola come percentuale della massa anidra, mediante la formula: $U = 100 (m_1 - m_2)/m_2$, dove: m_1 è la massa dei campioni allo stato fresco m_2 è la massa dei campioni allo stato anidro. La massa anidra è stata calcolata come media aritmetica delle masse anidre dei singoli campioni.

I dati raccolti sono volti all'avvio della creazione di un dataset utile allo sviluppo di specifiche equazioni allometriche a scala di singolo albero. Tali equazioni potranno essere di utilità nella quantificazione degli stock di carbonio dei popolamenti di Pino d'Aleppo, sia per la quantificazione a scala nazionale, sia per *voluntary carbon markets*.

I modelli utilizzati per la stima della biomassa dei differenti comparti arborei, basati su relazioni allometriche tra biomassa anidra e variabili a scala di singolo albero, sono:

$$W = k x^a \quad (1)$$

$$W = k x^a y^b \quad (2)$$

dove W è la variabile dipendente, k , a e b sono parametri stimati mediante analisi di regressione e x e y sono le variabili indipendenti del singolo albero. Le variabili indipendenti considerate per la stima della biomassa sono DBH e altezza.

Per il comparto del novellame sono state prelevate, con un metodo riferibile a quello del monolito, ma senza il ricorso al lavaggio dell'apparato radicale con getto d'acqua in pressione *in situ*, 5 esemplari interi per ciascuna delle principali specie presenti

(Roverella, *Quercus pubescens* Willd., e Pino d'Aleppo, *Pinus halepensis* Miller). Per ciascun esemplare sono stati misurati, mediante calibro a precisione millimetrica, i seguenti parametri: diametro al colletto, diametro a 5 cm, altezza totale del fusto, altezze di inserzione chioma verde e di quella secca (assente nella Roverella), area d'insidenza. Per la Roverella, che nel sito in esame ha conservato le foglie verdi durante il periodo invernale, è stata determinata la numerosità fogliare e stimati l'area fogliare (totale e media) e il LAI. La stima dell'area fogliare, è stata effettuata mediante scansione delle foglie di ciascuna pianta disposte su carta millimetrata. Le foglie sono state digitalizzate e l'area individuale e totale e media automaticamente misurata/calcolata in ambiente GIS. La conversione da unità GIS a cm² è stata ottenuta per proporzione. Il LAI è stato ottenuto rapportando l'area fogliare totale all'area di insidenza di ciascuna pianta. La determinazione della biomassa, sia per il Pino d'Aleppo sia per la Roverella, è stata effettuata con il metodo della pesata, precedentemente descritto (a temperatura di 60±2°C), sui seguenti comparti: fusto, rami e fusto, foglie, fittone, radici secondarie.

Per il comparto lettiera e orizzonte organico in ciascuna delle quattro aree di saggio principali sono stati prelevati 4 campioni da punti individuati con criterio casuale, e seguendo la metodologia proposta nelle linee guida per i rilevamenti di fase 3+ dell'Inventario forestale nazionale e dei serbatoi di carbonio (CFS 2008), servendosi di un quadrato di 0,30x0,30 m, ne è stato condotto il rilievo dello spessore e prelevati campioni per la determinazione del peso anidro secondo il metodo della pesata già specificato.

Per il comparto ipogeo (radici <1cm) sono stati prelevati per una delle aree di saggio di ciascuna tesi due cilindri (0,07x1 m) di suolo indisturbato per la determinazione della *root density* (Mg ha⁻¹) a profondità crescenti (0-0,2; 0,2-0,4; 0,4-0,6; 0,6-0,8; 0,8-1,0 m) e due cilindri indisturbati di suolo (0,07x0,6 m) per la determinazione delle principali caratteristiche chimiche del suolo (C_{tot} C_{org} N C/N SO pH) a profondità crescenti (0-0,2; 0,2-0,4; 0,4-0,6 m). Il prelievo dei cilindri è stato condotto secondo la metodologia proposta da Ellis e Barnes (1971, citato in Rubino, 1984). La separazione delle radici dal terreno è stata effettuata con il metodo Tennant (1975, citato in Rubino, 1984), che prevede il lavaggio dei campioni di suolo prima con una soluzione acquosa di esametafosfato di sodio 0,2% e quindi con acqua mediante l'apparato di Cahoon e Morton (1961, citato in Rubino 1984). Non è stata effettuata la separazione tra radici morte e radici vive. La determinazione delle caratteristiche chimiche del terreno è stata effettuata con metodologie standard.

La stima del contenuto di carbonio nei vari comparti è stata effettuata utilizzando il fattore di conversione indicato da Schlesinger (1991) e proposto dalla FAO (<http://www.fao.org/forestry/17111/en/>), secondo il quale il contenuto di carbonio della biomassa sarebbe pari a circa 0,475 della biomassa anidra. Questo coefficiente è considerato valido anche per il materiale morto, pur nella considerazione che il contenuto di carbonio può variare in funzione del grado di decomposizione, se il materiale può essere ancora identificato, come nel caso della lettiera. Nel presente lavoro, il coefficiente è stato

10. Primo contributo sulla capacità di accumulo del carbonio nei rimboschimenti di Pino d'Aleppo in Puglia

applicato anche al materiale morto non identificabile (e.g. orizzonte organico), pur nella consapevolezza che tale applicazione comporta una notevole sottostima dovuta alla perdita dei composti organici volatili.

In ciascuno dei due siti della provincia di Bari è stata istituita un'area di saggio (20x20 m) per la caratterizzazione strutturale e compositiva della fitocenosi, sempre con riguardo alle componenti arborea, arbustiva e novellame, e sono stati effettuati rilievi volti alla determinazione della biomassa arborea epigea (3 alberi in entrambi i siti) e ipogea (due alberi nel sito di Gioia del Colle) e dei relativi contenuti di carbonio, secondo le metodologie già indicate. Relativamente alla determinazione della biomassa ipogea si precisa che questa è con ogni probabilità sottostimata dal momento che sono state considerate oltre alla ceppaia, solo le radici già esposte e quelle estraibili senza impiego di mezzi meccanici. Le radici inoltre sono state suddivise in due categorie, con diametro medio < 1 cm e con diametro medio > 1 cm.

Infine per gli alberi modello della biomassa di tutti i siti considerati sono state prelevate sezioni di fusto in corrispondenza del diametro a 1,30 m per la determinazione delle età e la stima degli incrementi mediante il conteggio delle cerchie annuali con l'ausilio di un tavolo misuratore (Instrumenta Mechanik Labor System GmbH), abbinato ad un microscopio binoculare e del software dedicato, T-Tools Pro®.

10.3 Risultati

Le nove aree campione (1000 m²) istituite nei popolamenti di Pino d'Aleppo dei due versanti, molisano e pugliese del Lago di Occhito sono servite per la costruzione delle curve ipsometriche (*best fit*). Nel complesso, dal punto di vista strutturale, questi popolamenti sono riferibili a quelli di una III classe di fertilità (cfr. Castellani *et al.*, 1982) e si presentano piuttosto densi e caratterizzati da individui arborei di modeste dimensioni (Tab. 10.1).

Regione	DBH medio cm	H media m	G ha ⁻¹ m ²	n ha ⁻¹ n	Vd ha ⁻¹ m ³
Molise	16,34	12,30	28,49	1268	224,40
Puglia	17,55	13,61	26,23	1007	226,11

Tabella 10.1 Principali parametri dendrometrici dei popolamenti di Pino d'Aleppo del Lago di Occhito.

La caratterizzazione strutturale delle aree campione istituite sul versante molisano nelle due zone a densità più elevata e più ridotta tra quelle rilevate è evidenziata nella Tab. 10.2. Per quanto riguarda la struttura, il confronto con la tavola alsometrica (Castellani *et al.* 1982) indica il riferimento delle aree campione a minore densità alla II classe di fertilità, e di quelle a maggiore densità alla III classe di fertilità. Relativamente alla composizione di specie, per le aree a minore densità nello strato arboreo si nota la predominanza del Pino d'Aleppo, accompagnato sporadicamente dal Cipresso (*Cupressus sempervirens L.*) e dal Pino bruzio (*Pinus brutia Ten.*) e, nello strato arbustivo la presenza dell'Olivastro (*Olea oleaster Hoffmg et Link. var. sylvestris Brot.*) e della Roverella, presenti, insieme al Pino d'Aleppo anche nel novellame. Le aree a maggiore densità, invece, sono caratterizzate dalla esclusiva presenza del Pino d'Aleppo nello strato arboreo e dalla assenza sia dello strato arbustivo, sia del novellame.

Le due aree di saggio dei siti di Gioia del Colle e di Altamura (Tab. 10.2) dal punto di vista strutturale sono paragonabili alle prime due del sito del Lago di Occhito, mentre dal punto di vista compositivo sono caratterizzate dalla esclusiva presenza del Pino d'Aleppo nello strato arboreo e, rispettivamente, del Leccio (*Q. ilex L.*) e del Terebinto (*P. terebinthus L.*) oltre all'Olivastro e alla Roverella nello strato arbustivo e nel novellame e della Rosa canina (*Rosa canina L.*) e della Coccifera (*Q. coccifera L.*) nello strato arbustivo e del Pino d'Aleppo, della Roverella e del Biancospino (*Crataegus monogyna Jacq.*) nel novellame.

		Ads1 O	Ads2 O	Ads3 O	Ads4 O	Ads1 G	Ads1 M
n/400m ²	n	28	25	78	66	32	23
n/ha	n	700	625	1950	1650	800	575
DBH medio	cm	20,6	21,2	12,7	14,7	20,3	25,3
D base medio	cm	27,9	26,5	17,0	19,9	28,9	32,6
G/400m ²	m ²	1,0	0,9	1,0	1,2	1,1	1,2
G/ha	m ²	25,5	23,6	26,1	29,3	27,0	29,8
media H rilevate	m	14,0	13,8	11,6	11,7	15,8	14,4
volume dendrometrico /ha	m ³	215,3	196,3	182,3	206,5	257,4	258,3
copertura arborea	0,7	0,7	1,1	1,1	0,8	0,9	
copertura arbustiva	0,1	0,1	0,0	0,0	0,2	0,5	
altezza media strato arbustivo	m	1,3	0,7			0,4	1,4
n/m ² novellame	n	29	19			14	3
n/ha novellame	n	292.500	187.500	0	0	140.000	32.500
altezza media novellame	m	0,13	0,19			0,15	0,12

Tabella 10.2 Principali caratteri strutturali delle aree campione.

10. Primo contributo sulla capacità di accumulo del carbonio nei rimboschimenti di Pino d'Aleppo in Puglia

Le caratteristiche dendrometriche medie e la relativa variabilità dei 10 alberi modello della biomassa arborea epigea (4 per il sito Lago di Occhito e 3 per ciascuno degli altri siti) sono riportate nella Fig. 10.5.

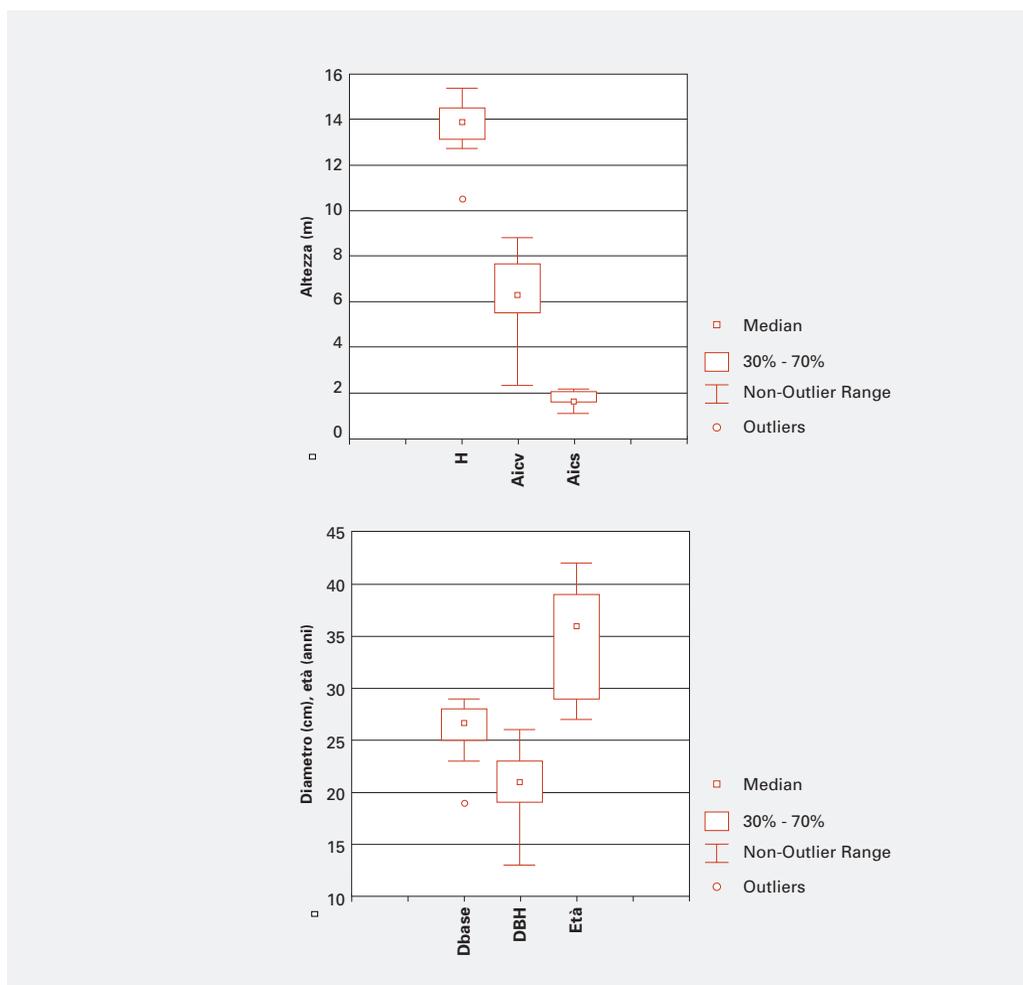


Figura 10.5 Caratteristiche dendrometriche medie e relativa variabilità dei 10 alberi modello della biomassa arborea epigea.

La maggior parte della biomassa arborea epigea risulta allocata nel fusto (60% circa) e nel complesso della chioma verde (25% circa), mentre proporzioni significativamente minori risultano allocate nella chioma secca (4% circa) e negli strobili (2% circa) Fig.10.6 e 10.7.

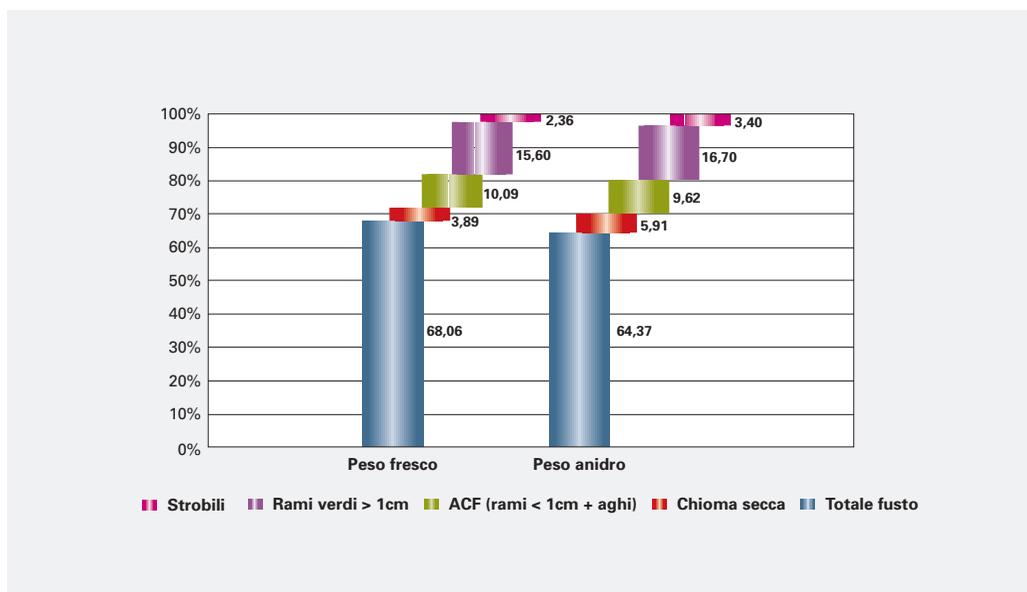


Figura 10.6 Ripartizione in termini relativi della biomassa allo stato umido ed allo stato anidro nei diversi comparti.

10. Primo contributo sulla capacità di accumulo del carbonio nei rimboschimenti di Pino d'Aleppo in Puglia

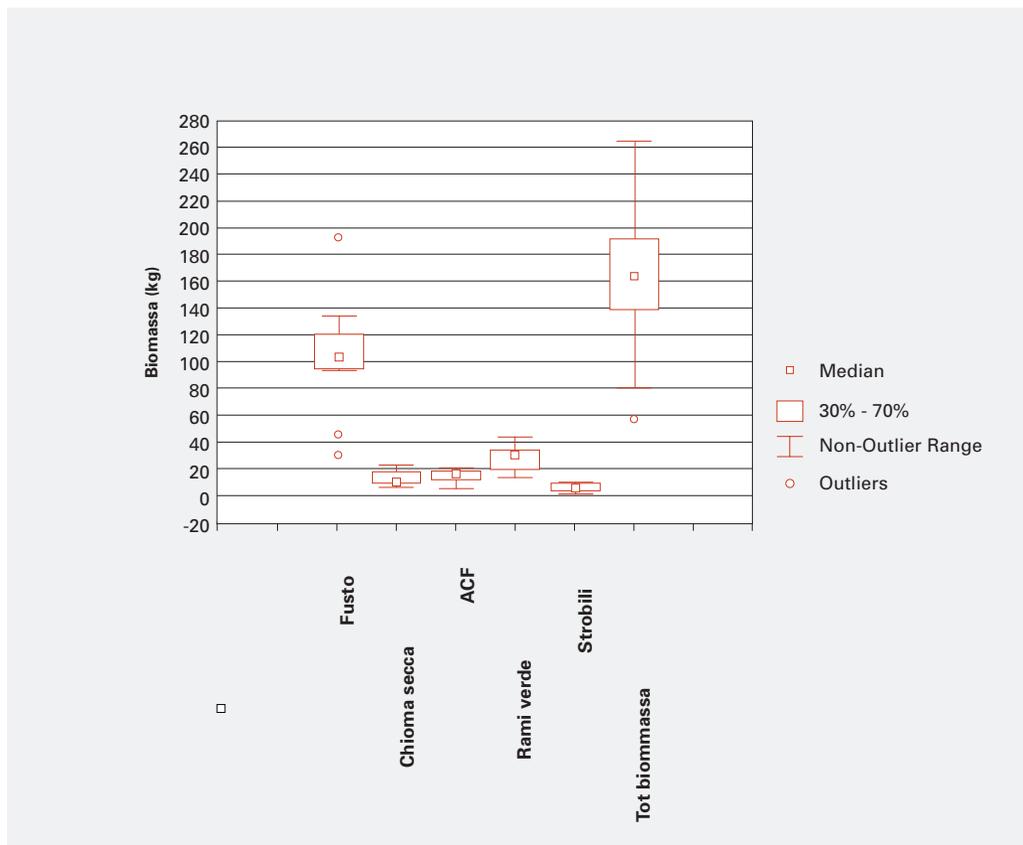


Figura 10.7 Importanza relativa e variabilità della biomassa arborea epigea allo stato anidro, in termini assoluti, nei diversi comparti.

Dal confronto fra la biomassa allo stato fresco e quella allo stato anidro, come atteso, si evidenzia una minore variabilità tra gli alberi modello relativamente alla biomassa allo stato anidro (Fig. 10.8 e 10.9) ed una netta differenza di umidità tra i comparti del fusto e chioma verde rispetto a quelli della chioma secca e degli strobili (Fig. 10.10).

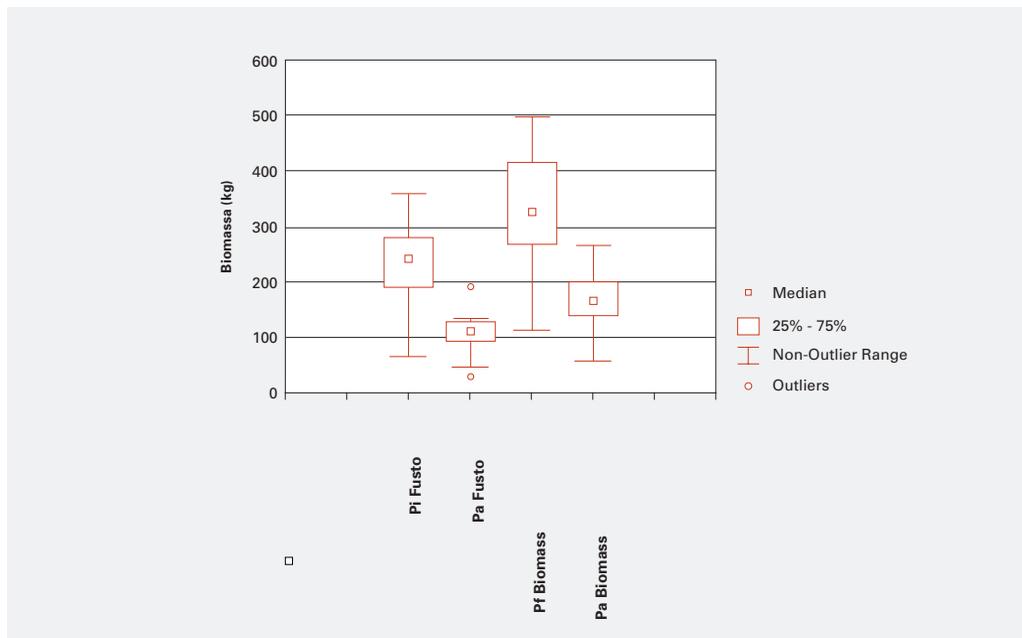


Figura 10.8 Confronto tra biomassa allo stato umido ed anidro (fusto e totale biomassa arborea epigea).

10. Primo contributo sulla capacità di accumulo del carbonio nei rimboschimenti di Pino d'Aleppo in Puglia

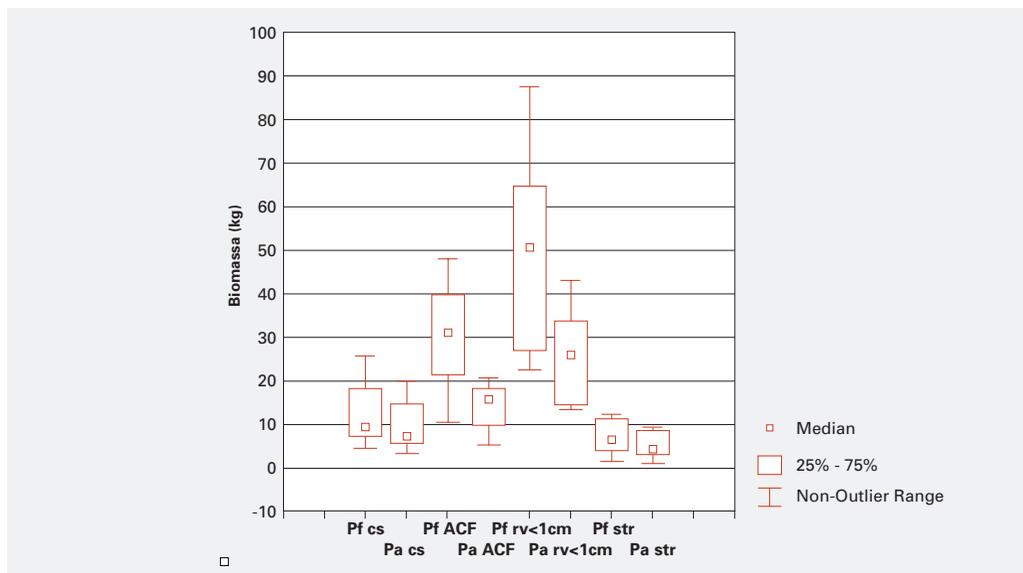


Figura 10.9 Confronto tra biomassa allo stato umido ed anidro (chioma verde, chioma secca, strobili).

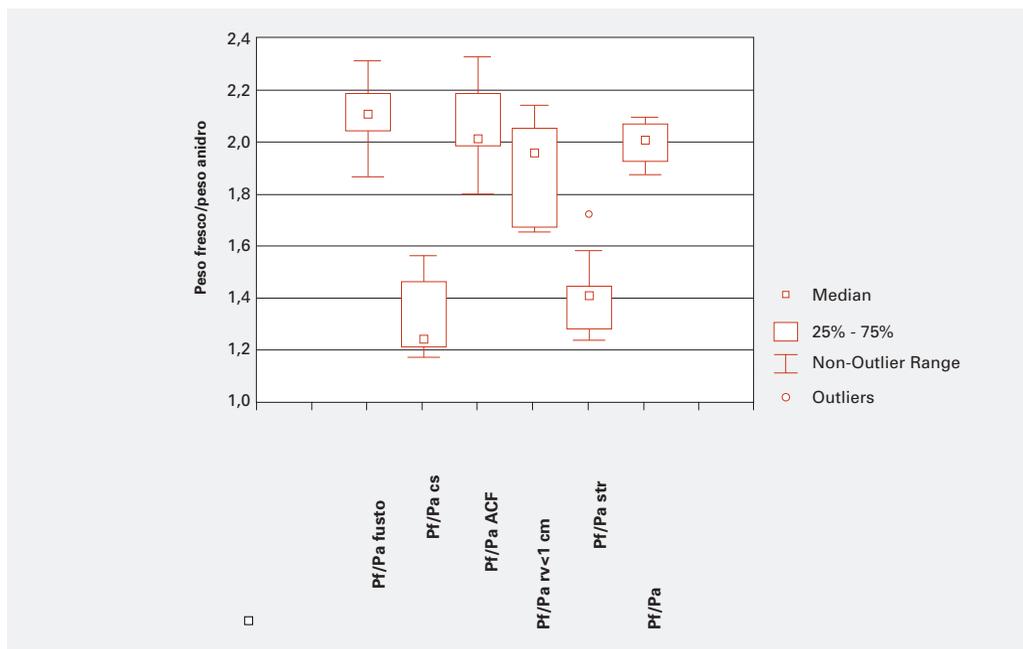


Figura 10.10 Confronto tra il contenuto di umidità dei diversi comparti della biomassa arborea epigea.

Si rileva inoltre una significativa correlazione positiva tra la biomassa (espressa in peso) allo stato anidro ed allo stato umido e una ridotta variabilità ($0,50 \pm 0,02$) del rapporto tra i due valori pa/pf. dei differenti comparti (Tab. 10.3).

	Pf_fusto	Pf_cs	Pf_ACF	Pf_rv > 1 cm	Pf_str	Pf_tae
Pa_fusto	0,982					
Pa_cs		0,978				
Pa_ACF			0,979			
Pa_rv > 1 cm				0,979		
Pa-str					0,984	
Pa_tae						0,991

Tabella 10.3 Relazioni tra valori della biomassa allo stato umido e allo stato fresco.

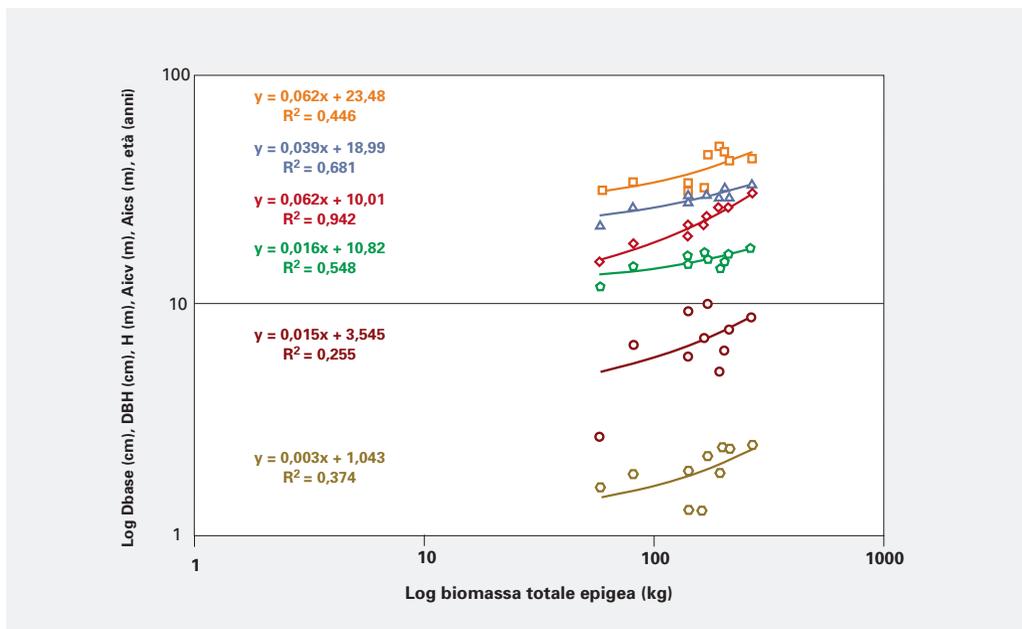


Figura 10.11 Relazioni tra biomassa arborea epigea allo stato anidro e principali parametri dendrometrici e l'età.

10. Primo contributo sulla capacità di accumulo del carbonio nei rimboschimenti di Pino d'Aleppo in Puglia

Circa le relazioni tra biomassa arborea epigea anidra totale e parametri dendrometrici (Fig. 10.11), una correlazione positiva significativa sussiste solo con il DBH ($r^2=0,942$), il diametro al colletto ($r^2=0,681$) e l'altezza ($r^2=0,548$), mentre non sono significative le relazioni con la profondità della chioma e l'età.

Quanto alle relazioni tra biomassa arborea epigea anidra totale e quelle dei differenti comparti, questa risulta correlata positivamente solo a quella del fusto ($r^2=0,971$) ed a quella dei rami verdi con diametro maggiore di un centimetro ($r^2=0,511$).

Anche per la biomassa ipogea dei due alberi del sito di Gioia del Colle (Tab. 10.3) si nota per tutte le componenti una buona corrispondenza tra peso anidro e peso umido e una ridotta variabilità ($0,56\pm 0,12$) del rapporto tra i due valori. La componente ceppaia e quella delle radici con diametro maggiore di 1 cm costituiscono la maggior parte della biomassa ipogea, mentre, ovviamente, ridotto appare il contributo (tra l'altro con ogni probabilità sottostimato) delle radici con diametro minore di 1 cm. Nel complesso la biomassa ipogea rappresenta mediamente circa il 16% della biomassa totale e lo *root/shoot* ratio medio risulta pari a 0,19.

Le specifiche relative ai modelli selezionati per la stima della biomassa anidra dei diversi comparti arborei e i relativi parametri sono riportati nella Tab. 10.3.

Componente	Equazione	Parametri	R ² adj
Chioma	$k \text{ DBH}^a$	$k = 0.488$ $a = 1.534$	0.78
Fusto	$k \text{ DBH}^a$	$k = 0.061$ $a = 2.468$	0.89
Totale biomassa epigea	$k \text{ DBH}^a$	$k = 0.2544$ $a = 2.138$	0.92

Tabella 10.4 Equazioni allometriche per ciascuna componente della biomassa.

La variabile DBH é risultata essere fortemente correlata con la biomassa anidra della chioma (rami verdi > 1cm + ACF + chioma secca), del fusto e con quella totale, in accordo con quanto riportato da altri autori (Zianis et. al., 2005). Mentre la variabile H é risultata non necessaria per la stima delle diverse variabili indipendenti considerate.

Lo studio degli accrescimenti annuali degli alberi modello della biomassa evidenzia una relazione positiva tra il diametro a 1,30 e l'età (Fig. 10.12).

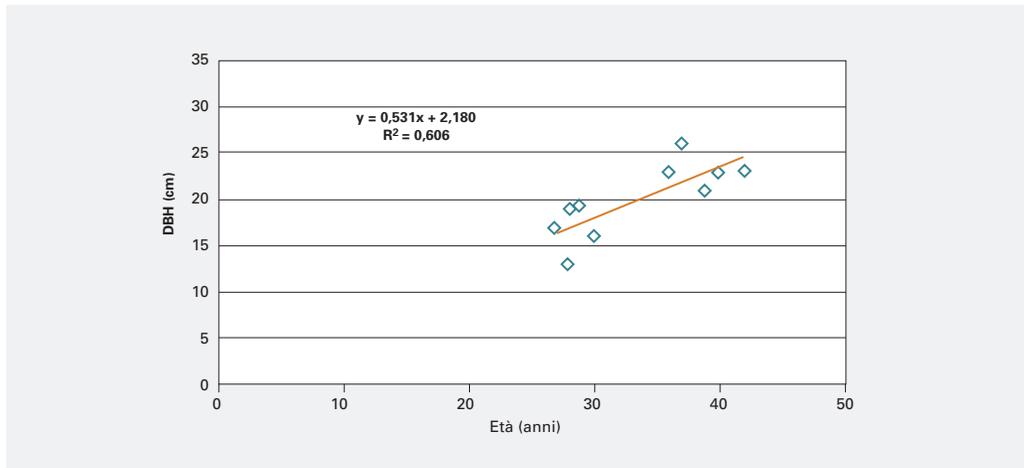


Figura 10.12 Relazione età-DBH.

La costruzione delle curve incrementali indica che gli accrescimenti più sostenuti si registrano nel sito di Gioia del Colle, seguito dal Sito del Lago di Occhito relativamente alla stazione a densità minore, da quello di Altamura e, infine dal sito del Lago di Occhito relativamente alla stazione a densità maggiore (Fig. 10.13).

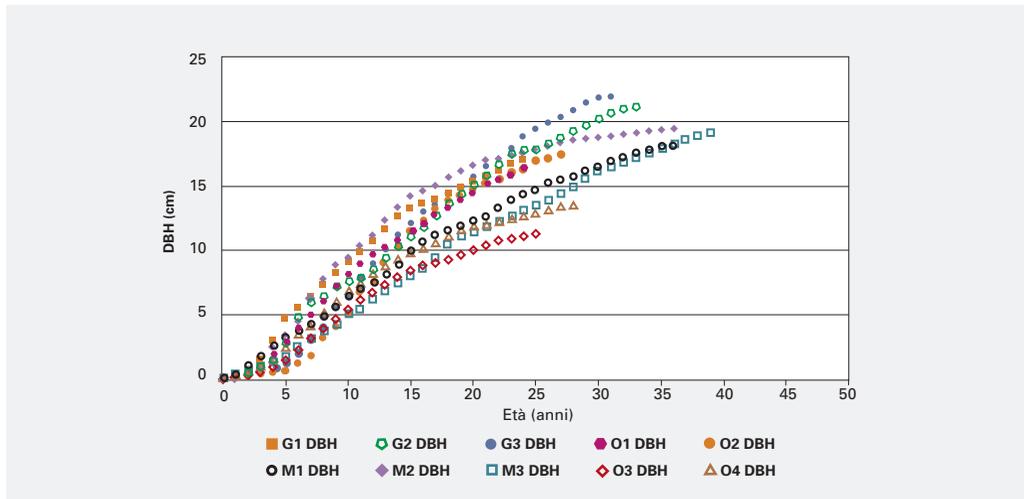


Figura 10.13 Curve incrementali relative agli alberi modello della biomassa arborea.

10. Primo contributo sulla capacità di accumulo del carbonio nei rimboschimenti di Pino d'Aleppo in Puglia

Gli altri *pool* della biomassa della fitocenosi, sono stati studiati solo per il sito del Lago di Occhito.

Per quanto riguarda la biomassa del novellame si evidenziano notevoli differenze tra la Roverella e il Pino d'Aleppo. Gli esemplari della prima specie sono caratterizzati da valori mediamente più elevati dei parametri osservati, ma anche da una maggiore variabilità tra gli esemplari esaminati (Tab. 10.5 e 10.6).

	Area insidenza	LAI	Foglie	Fusto e rami	Epigea (foglie) fusto e rami	Fi ttone	Radici secondarie	Ipogea (fi ttone e radici sec)	Totale	Rs/S	R/S
	cm ²	cm ² /cm ²	g	g	g	g	g	g	g		
R1	330,06	0,56	2,56	4,56	7,12	28,01	1,91	29,92	37,04	0,27	4,20
R2	415,48	0,32	7,76	7,16	14,92	45,91	1,00	46,91	61,83	0,07	3,14
R3	153,94	0,52	2,74	2,35	5,09	9,993	0,51	10,44	15,53	0,10	2,05
R4	38,48	0,64	0,24	0,33	0,57	11,49	0,89	12,38	12,95	1,56	21,72
R5	1385,44	0,59	26,64	19,15	45,79	62,75	14,67	77,42	123,21	0,32	1,69
Media	464,68	0,53	7,99	6,71	14,70	31,62	3,80	35,41	50,11	0,46	1,46
Dev. St	535,39	0,12	10,78	7,40	18,14,	22,70	6,10	27,27	45,36	0,62	8,53

Tabella 10.5 Valori dei principali parametri indici per il novellame di Roverella.

	Area insidenza	Foglie	Fusto e rami	Epigea (foglie) fusto e rami	Fi ttone	Radici secondarie	Ipogea (fi ttone e radici sec)	Totale	Rs/S	R/S
	cm ²	g	g	g	g	g	g	g		
PdA1	346,36	3,97	4,99	8,96	1,36	1,06	2,42	11,38	0,12	0,27
PdA2	254,47	2,03	2,21	4,24	1,05	0,55	1,60	5,84	0,13	0,38
PdA3	330,06	1,88	2,42	4,30	0,62	0,26	0,88	5,18	0,06	0,20
PdA4	298,65	2,40	2,80	4,20	0,72	0,14	0,86	5,06	0,03	0,20
PdA5	510,71	4,64	6,53	11,17	1,61	1,16	2,77	13,94	0,10	0,25
Media	348,05	2,98	3,59	6,57	1,07	0,63	1,71	8,28	0,09	0,26
Dev. St.	97,44	1,24	2,07	3,28	0,42	0,46	0,87	4,11	0,04	0,07

Tabella 10.6 Valori dei principali parametri indici per il novellame di Pino d'Aleppo.

La biomassa totale e la biomassa epigea in entrambe le specie risultano significativamente correlate all'area di insidenza e, nella Roverella la stessa relazione appare anche per la biomassa ipogea (Fig. 10.14 e 10.15).

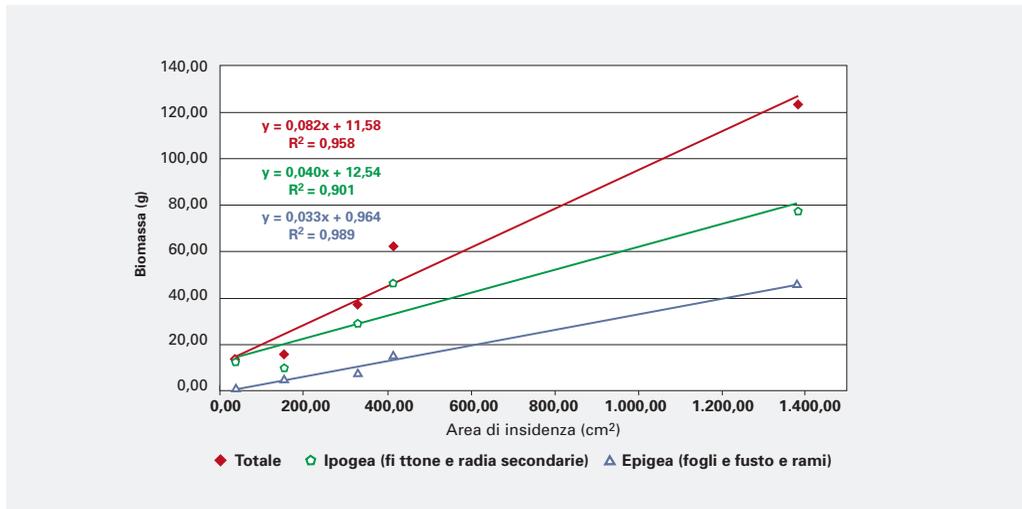


Figura 10.14 Relazioni tra biomassa e area di insidenza per la Roverella.

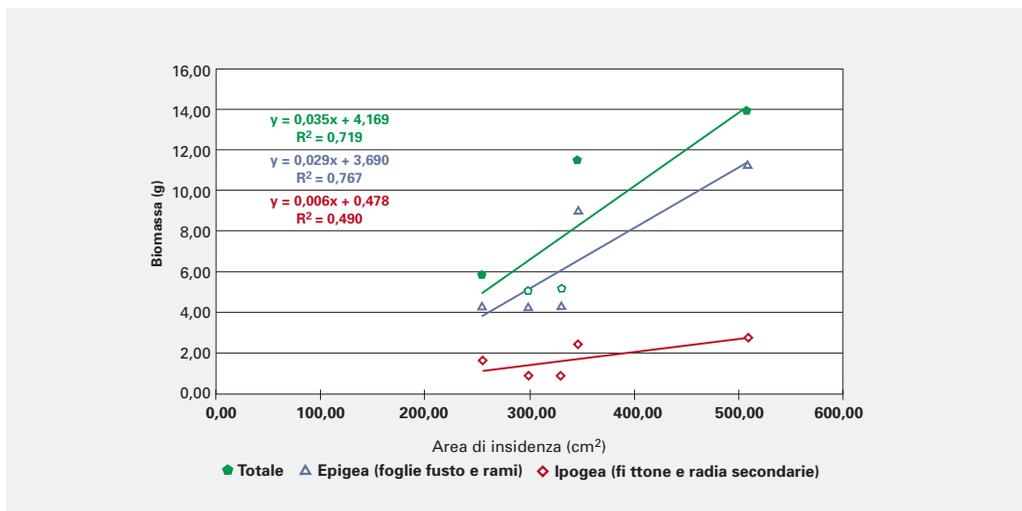


Figura 10.15 Relazioni tra biomassa e area di insidenza per il Pino d'Aleppo

10. Primo contributo sulla capacità di accumulo del carbonio nei rimboschimenti di Pino d'Aleppo in Puglia

Le indagini sul comparto lettiera orizzonte organico hanno rivelato la presenza di una forma di humus riferibile all'ordine del *mor* per la presenza di tutti e tre i sub orizzonti organici L, F, e H. In questo studio, all'insieme dei primi due ci si è riferiti con il termine lettiera, mentre il terzo è stato definito orizzonte organico. L'area campione a minore densità sembra caratterizzata da valori maggiori di lettiera (in termini ponderali) mentre non si notano differenze relativamente all'orizzonte organico (Fig. 10.16). Per quanto riguarda lo spessore invece, nell'area campione a minore densità ad un minore spessore della lettiera fa riscontro un maggiore spessore dell'orizzonte organico rispetto all'area a maggiore densità. Il contenuto di umidità dell'orizzonte organico dell'area a maggiore densità risulta sensibilmente più elevato. Infine, con riguardo all'orizzonte organico, per entrambe le aree delinea una relazione positiva tra spessore dell'orizzonte organico e biomassa espressa in termini ponderali (Fig. 10.17).

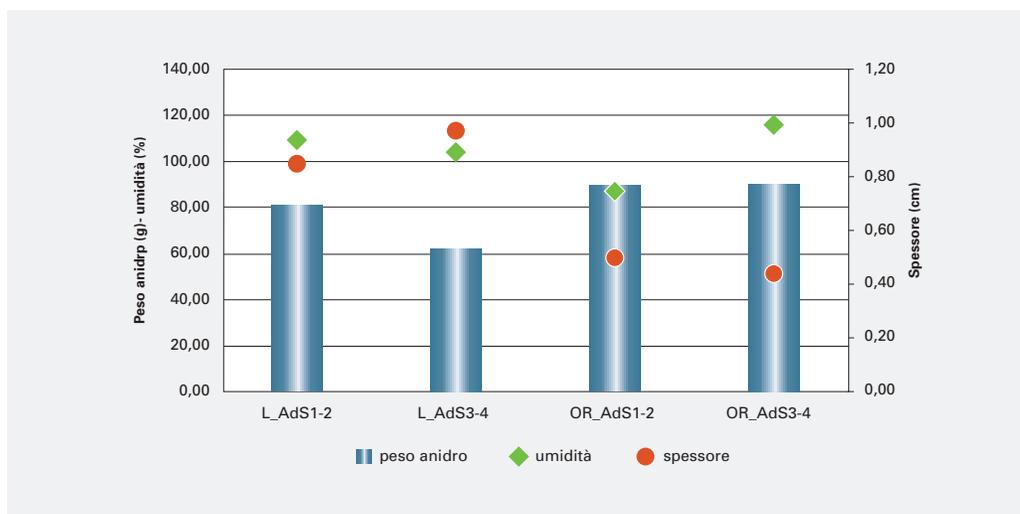


Figura 10.16 Biomassa anidra, conte tenuto di umidità e spessore della lettiera (orizzonti L e F) e dell'orizzonte organico (orizzonte H).

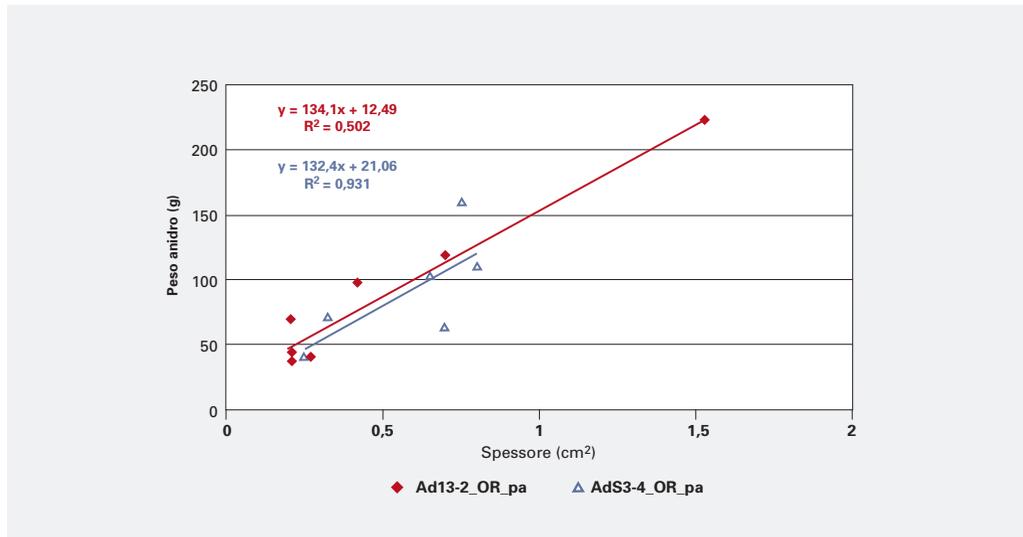


Figura 10.17 Relazioni tra biomassa anidra e spessore dell'orizzonte organico.

La biomassa radicale (radici <1cm) anidra decresce con la profondità in entrambe le aree e risulta significativamente più elevata nell'area campione caratterizzata da maggiore densità rispetto a quella a minore densità (Fig.10.18 a e b). I valori medi tra le due aree campione della percentuale di biomassa radicale nei primi 30 cm di suolo (75%), densità radicale espressa in kg m^{-2} (3,75) e di *root/shoot* ratio (0,33), consentono in primissima approssimazione di riferire il sistema studiato ad un sistema caratterizzato da un profilo radicale mediamente profondo, paragonabile a quello del bioma della foresta decidua tropicale della carta globale della distribuzione dei sistemi radicali proposta da Jackson *et al.* (1996), i cui valori di riferimento per i parametri indicati sono, rispettivamente 70%, 4,1 e 0,34, cui corrisponde un valore del coefficiente di estinzione radicale (β) pari a 0,961 nel modello di Gale e Grigal (citato in Jackson *et al.* 1996), che rappresenta un indice di distribuzione verticale delle radici.

10. Primo contributo sulla capacità di accumulo del carbonio nei rimboschimenti di Pino d'Aleppo in Puglia

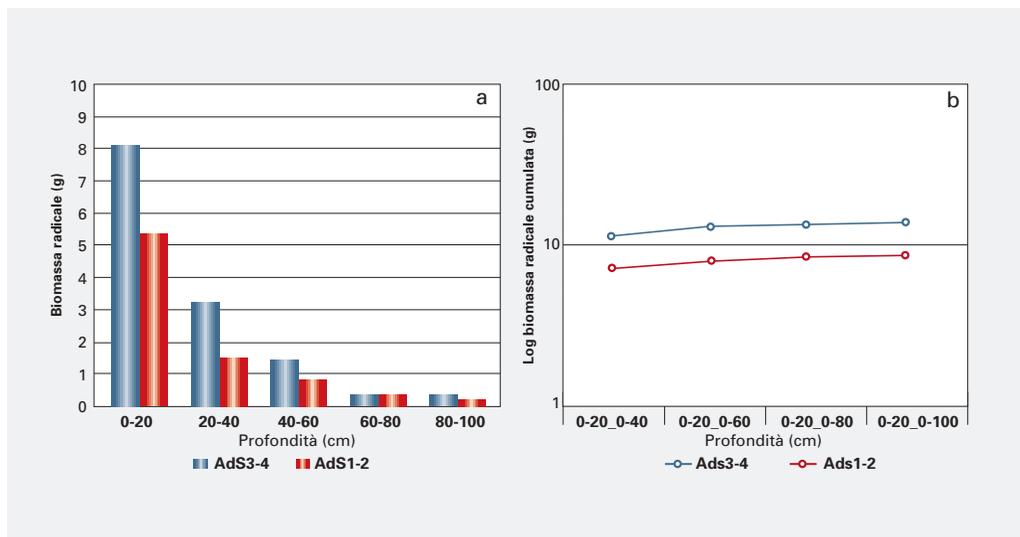


Figura 10.18 Andamento della biomassa radicale in funzione della profondità (a); biomassa radicale cumulata (b).

Una sintesi dei valori di biomassa determinati per i vari comparti studiati e dei relativi contenuti di carbonio e CO₂ equivalente è riportata nella Tab. 10.7 e nella Fig. 10.18. La produttività primaria netta è stata calcolata come la sommatoria della biomassa legnosa, di novellame, di investimento nelle radici e di lettiera e orizzonte organico, riferita all'età degli alberi.

	Biomassa		Contenuto di carbonio		CO ₂ Equivalente			
	AdS 3-4	AdS1-2	AdS 3-4	AdS 1-2	AdS 3-4	AdS 1-2	AdS 3-4	AdS 1-2
	Mg ha ⁻¹	Mg ha ⁻¹	Mg ha ⁻¹	Mg ha ⁻¹	Gh ha ⁻¹	Gh ha ⁻¹	%	%
Produttività (Mgha ⁻¹ a ⁻¹) (Ggha ⁻¹ a ⁻¹)		6,10	3,23	2,90	0,012	0,011		
Strato arboreo (epigeo)	124,01	100,20	58,90	47,59	0,216	0,175	66,26	63,21
Rinnovazione		10,17		4,83	0,000	0,018		6,41
Lettiga	6,91	9,37	3,28	4,45	0,012	0,016	3,69	5,91
Orizzonte organico	10,08	10,01	4,79	4,76	0,018	0,017	5,39	6,32
Radici <1cm (ipogea)	46,16	28,78	21,93	13,67	0,080	0,050	24,67	18,16
Totale	187,16	158,52	88,90	75,30	0,326	0,276	100	100

Tabella 10.7 Biomassa, contenuto di carbonio, CO₂ equivalente per ettaro e produttività primaria netta dei rimboschimenti del lago di Occhito.

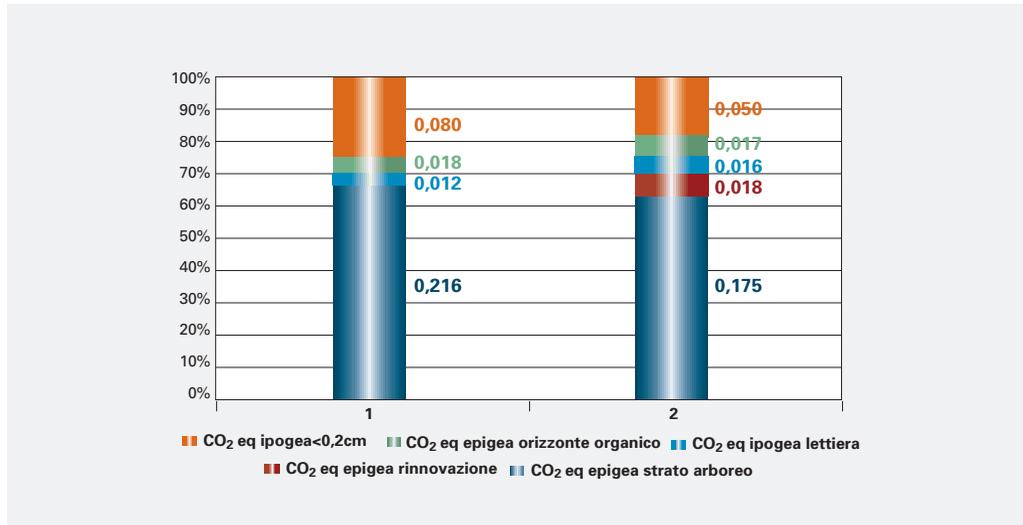


Figura 10.19 CO₂ equivalente per ettaro dei rimboschimenti del Lago di Occhito.

I valori di questi parametri (e quindi lo *stock* attuale di carbonio) risultano più elevati per le aree campione a maggiore densità, rispetto a quella a minore densità, soprattutto nei comparti della biomassa epigea e di quella ipogea. Del tutto paragonabili risulterebbero gli apporti dell'orizzonte organico, mentre l'area di studio a minore densità si differenzia per il maggior apporto di lettiera e per quello della novellame.

Ricordando, tra l'altro, che non è stata determinata la biomassa dello strato arbustivo, presente solo nell'area campione a minore densità si deve rilevare come la prospettiva di accumulo del sistema a minore densità, costituito da individui arborei il cui sviluppo, soprattutto diametrico, è ancora relativamente sostenuta (incremento medio di diametro 0,64 cm a⁻¹) e in cui si sta sviluppando ed affermando la novellame, apparirebbe migliore rispetto ad un sistema caratterizzato da una forte competizione per il biospazio e da accrescimenti ben più ridotti (incremento medio di diametro 0,45 cm a⁻¹).

Per quanto riguarda il suolo, i risultati delle analisi di laboratorio sui campioni di terreno, relativamente al dato medio delle tre profondità campionate (Fig.10.20), sembrano indicare la presenza di tenori inferiori di N, sostanza organica, e carbonio organico, nonché un minore rapporto C/N nel sistema a minore densità. Questa indicazione è coerente con le conoscenze relative all'andamento dei processi che attengono al carbonio nelle successioni secondarie (Chapin *et al.*, 2002; Alberti *et al.*, 2008), secondo le quali durante la prima fase della successione il sistema si comporterebbe come un *source* per

10. Primo contributo sulla capacità di accumulo del carbonio nei rimboschimenti di Pino d'Aleppo in Puglia

far fronte alle necessità di respirazione e formazione di tessuti dei microrganismi e della vegetazione che si sta insediando. Tuttavia, si nota, come alla profondità intermedia (0,2-0,4 m) il contenuto di SO e di Corg nella tesi a minore densità appaia lievemente superiore (Fig. 10.21). Ciò potrebbe indicare l'avvio dei processi di accumulo di carbonio.

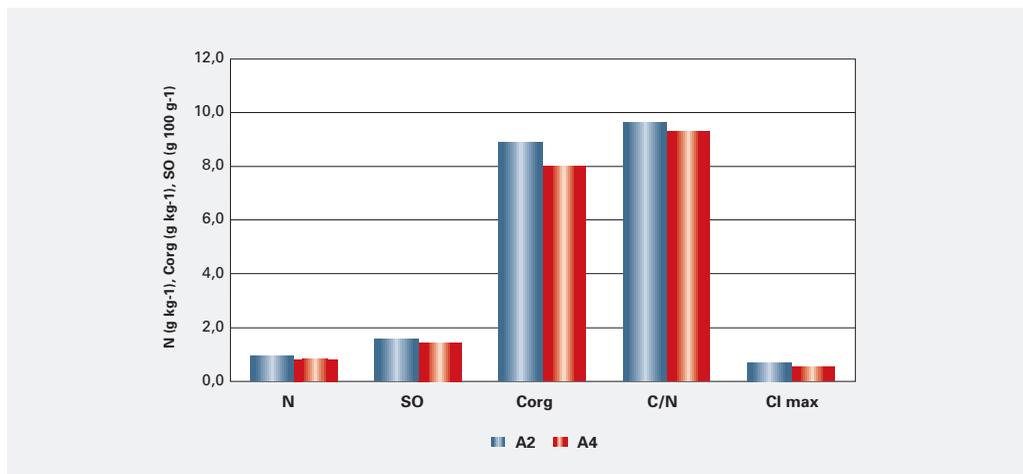


Figura 10.20 Contenuto di azoto, sostanza organica, carbonio organico, rapporto carbonio/azoto e capacità idrica massima nel suolo (A2 tesi a maggiore densità, A4 tesi a minore densità).

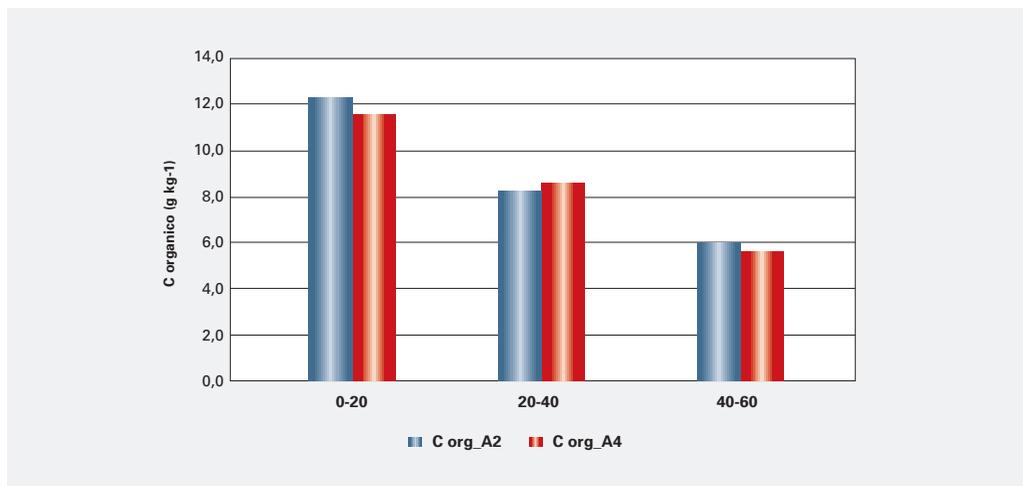


Figura 10.21 Contenuto di carbonio organico, rapporto carbonio/azoto e capacità idrica massima nel suolo a differenti profondità (A2 tesi a maggiore densità, A4 tesi a minore densità).

Inoltre, se si considerano i differenti comparti della biomassa arborea epigea (Tab. 10.7) si nota come il sistema a minore densità sia caratterizzato (Tab. 10.8), oltre che da un sensibile maggiore investimento nel fusto, e quindi in tessuti a maggiore carattere di permanenza, anche da un sensibilmente minore apporto di biomassa derivante dalle parti secche della chioma e dall'*Available Fuel Canopy*, quelle parti dell'albero che alimentano l'incendio di chioma. Quindi questo sistema sarebbe caratterizzato da un minore rischio di perdita dello stock e delle capacità di continuare ad accumulare carbonio nell'evento di un incendio di questo tipo.

	AdS O 3-4	AdS O 1-2	AdS O 3-4	AdS O 1-2
	Mg ha ⁻¹	Mg ha ⁻¹	%	%
fusto	69,23	65,72	56	66
chioma secca	8,22	4,90	7	5
ACF	16,57	9,55	13	10
Rami verdi > 1 cm	25,28	17,81	20	18
Strobili	4,71	2,21	4	2
	124,01	100,20	100	100

Tabella 10.8 Contributi alla biomassa arborea epigea dei singoli comparti.

10.4 Discussione

È stata avviata la costruzione di un database dei parametri relativi all'accumulo di carbonio rimboschimenti di Pino d'Aleppo della Puglia in fase di naturalizzazione.

Un primo risultato di questo studio è rappresentato dall'aver individuato possibili relazioni, per esempio: tra biomassa e diametro delle piante arboree, biomassa allo stato anidro e biomassa allo stato fresco, area di insidenza e biomassa degli individui del novellame, spessore e biomassa dell'orizzonte organico. Tali relazioni dovrebbero essere ulteriormente studiate mediante l'ampliamento del *dataset*, sia in termini quantitativi sia in termini qualitativi, ovvero con osservazioni estese anche al Gargano, all'Arco ionico e al Salento.

Infatti, nel caso per i rimboschimenti di Pino d'Aleppo venisse confermata la possibilità di modellizzare il contenuto di carbonio attraverso alcune di esse, tali relazioni potrebbero risultare utili per semplificare le procedure di determinazione della biomassa limitando la necessità di campionamenti distruttivi nelle fasi di raccolta dei dati in bosco.

Inoltre, esse potrebbero essere funzionali alla costruzione di curve allometriche

10. Primo contributo sulla capacità di accumulo del carbonio nei rimboschimenti di Pino d'Aleppo in Puglia

specifiche per questo tipo di sistemi in Puglia. Infatti, per esempio, i risultati preliminari relativi alle equazioni allometriche costruite per la componente arborea epigea sembrano essere promettenti, soprattutto considerando che la provenienza dei dati da popolamenti differenti e con diversa localizzazione geografica le rende più attendibili a scala regionale.

Infine, tali dati potrebbero essere funzionali alla parametrizzazione di modelli semplificati di processo ecosistemico (Minunno, 2009; Xenakis *et al.*, 2008) per la stima a medio termine del bilancio del carbonio nei rimboschimenti di Pino d'Aleppo della Puglia in fase di naturalizzazione, nonché alla validazione dei metodi indiretti di stima del contenuto di carbonio per questo tipo di sistemi (Federici *et al.* 2008).

Per esempio, se i valori di contenuto di carbonio ottenuti risultano confrontabili per ordine di grandezza con quelli ottenibili mediante la stima della biomassa epigea ($BE = 55,98 \text{ Mg ha}^{-1}$ e $59,27 \text{ Mg ha}^{-1}$, rispettivamente nell'area campione a maggiore densità ed in quella a minore densità) ed ipogea ($BE = 14,78 \text{ Mg ha}^{-1}$ e $12,08 \text{ Mg ha}^{-1}$) attraverso le relazioni proposte da Federici *et al.* (2008) quale metodo indiretto di stima della biomassa partendo dai valori del volume dendrometrico e impiegando i valori tabellati di BEF e WBD per le piantagioni di conifere, tuttavia si nota come essi indicherebbero la superiorità dell'accumulo parte del sistema rimboschimento in fase di naturalizzazione, contrariamente a quanto effettivamente osservato in via preliminare.

I risultati ottenuti con questo studio preliminare, quindi, al di là della loro ridotta valenza statistica, rappresentano una prima indicazione circa le potenzialità dei rimboschimenti di Pino d'Aleppo in fase di rinaturalizzazione rispetto all'accumulo di carbonio. A titolo di esempio, ammettendo di poter estendere i valori ottenuti al totale delle formazioni a prevalenza di Pino d'Aleppo della Puglia (29.012 ha, dati IFNC), si può indicativamente stimare un contributo di queste formazioni allo stock complessivo delle foreste italiane (al 2006, cfr. Federici *et al.*, 2008) pari a 8.733,53 Gg CO₂ equivalente (0,15%).

Quindi si sottolinea ancora una volta il ruolo dei boschi e piantagioni forestali già esistenti per il rispetto degli impegni internazionali di protezione ambientale e la grande importanza che assume la gestione forestale, secondo il dettato dell'art. 4 del Protocollo di Kyoto, che nel caso specifico vada nella direzione di favorire i processi di naturalizzazione in atto. Trattandosi inoltre, nel caso in esame, di rimboschimenti ricadenti in aree importanti dal punto di vista della conservazione della natura, una simile finalità gestionale assume anche un'altra forte valenza.

10.5 Ringraziamenti

Si ringrazia il Consorzio di Bonifica della Capitanata, l'Amministrazione comunale di Gioia del Colle e l'IRIF Puglia per aver autorizzato i rilievi nei rispettivi comprensori.

Si ringrazia il Prof. Achille Pellerano e il tecnico di laboratorio Sig. Enrico Liano, del Dipartimento PROGESA dell'Università degli Studi di Bari, rispettivamente, per il supporto concettuale e operativo alla determinazione della biomassa anidra.

Si ringrazia il Prof. Pietro Rubino per i consigli relativi alla conduzione dei rilievi sulla biomassa ipogea con il metodo delle carote di suolo e il tecnico di laboratorio Sig. Donato Guarini, del DSPV dell'Università degli Studi di Bari, per il supporto alla conduzione dei rilievi ed alla estrazione delle radici e per la conduzione delle analisi di laboratorio sui campioni di suolo.

Si ringrazia il dott.jr. Giovanni Discipio per la collaborazione ai rilievi in bosco.



11

Conclusioni

Giovanni Sanesi, Paola Mairota

La quantità di carbonio immagazzinato nelle foreste italiane (*stock*) è stimata pari a oltre 1.1 milioni di tonnellate (ISPRA, 2009), di cui il 48% nella biomassa viva, il 3% nella necromassa e il 49% nel suolo.

Questo *stock* è ancora in fase di crescita. Ciò è dovuto essenzialmente all'espansione della superficie forestale nazionale e alle politiche di conservazione e di tutela delle foreste. Peraltro una certa preoccupazione destano le emissioni legate agli incendi e, nel breve-lungo periodo, la possibile riduzione della capacità fissativa delle foreste per effetto dei cambiamenti climatici.

All'attualità, la quantità netta (*sink*) di carbonio fissato annualmente dai boschi italiani nelle loro diverse componenti (biomassa, lettiera, suolo) è mediamente pari a oltre 7 milioni di tonnellate (ISPRA, 2009), corrispondenti a oltre 25 milioni di tonnellate di CO₂ sottratte annualmente all'atmosfera (peraltro, questo valore medio netto può registrare sensibili diminuzioni in annate caratterizzate da forte incidenza degli incendi forestali, come a esempio è avvenuto nel 2007 con quasi 107 mila ettari coinvolti).

In linea generale si può comunque affermare che ogni iniziativa di gestione sostenibile del patrimonio forestale concorre a incrementare o almeno a stabilizzare la funzione di C-*sink* dei sistemi forestali. Infatti, l'idea stessa di gestione forestale sostenibile implica una gestione consapevole delle foreste che ne limita lo sfruttamento eccessivo, garantendo così la conservazione di un certo *stock* di carbonio nel tempo. Ciò tuttavia non può prescindere dalle caratteristiche dell'intervento e dal contesto economico, sociale ed ambientale in cui è realizzato. Infatti, la realizzazione di nuovi serbatoi forestali di carbonio o la lotta alla degradazione e alla deforestazione hanno un senso – e una maggior convenienza economica – in ragione della multifunzionalità di questo tipo di interventi.

Nella consapevolezza che la riduzione delle emissioni in atmosfera possa avvenire innanzitutto attraverso la realizzazione di nuovi modelli di consumo energetico, anche interventi nel settore forestale a scala nazionale e regionale potranno dare il loro contributo; soprattutto se questi acquistano una dimensione multifunzionale. Infatti, se il beneficio apportato non si limita soltanto alla funzione di *C-sink* del nuovo bosco, ma anche ad esempio alla funzione paesaggistica, sociale, protettiva, produttiva, idrogeologica, questi interventi trovano una loro sostenibilità economica e possono trovare spazio all'interno di diverse iniziative di finanziamento pubblico. Ne sono un esempio i Piani di Sviluppo rurale avviati a livello regionale che prevedono interventi di afforestazione e riforestazione e di conservazione degli *stock* di carbonio esistenti con un incremento diretto sulla fissazione della CO_2 atmosferica.

Se indubbio è il ruolo delle foreste nella mitigazione del cambiamento climatico tuttavia queste rappresentano dei pozzi di C relativamente vulnerabili e mutabili nel tempo perché soggetti ad una serie di interventi esterni come incendi, utilizzazioni antropiche che possono riportare la CO_2 precedentemente fissata in atmosferica.



Tabella 11.1 L'impiego delle biomasse forestali sta assumendo sempre più interesse come fonte energetica alternativa.



12

Bibliografia

12.1 Capitolo 2

BINDOFF, N.L., J. WILLEBRAND, V. ARTALE, A. CAZENAVE, J. GREGORY, S. GULEV, K. HANAWA, C. LE QUÉRÉ, S. LEVITUS, Y. NOJIRI, C.K. SHUM, L.D. TALLEY AND A. UNNIKRISHNAN, 2007: *Observations: Oceanic Climate Change and Sea Level*. In: *Climate Change: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

CANADELL J.G., LE QUE'RE' C., RAUPACH M.R., FIELD C.B., BUITENHUISE T., CIAIS P., CONWAY T.J., GILLETT N.P., HOUGHTON R.A., MARLAND G. (2007) *Contributions to accelerating atmospheric CO₂ growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks*. PNAS 104(47) 18866–18870.

CHIH-HSIN C., LEHMANN J., ENGELHARD M.H. (2008). *Natural oxidation of black carbon in soils: Changes in molecular form and surface charge along a climosequence*. *Geochemica et Cosmochemica ACTA* 72: 1598-1599.

DENMAN, K.L., G. BRASSEUR, A. CHIDTHAISONG, P. CIAIS, P.M. COX, R.E. DICKINSON, D. HAUGLUSTAINE, C. HEINZE, E. HOLLAND, D. JACOB, U. LOHMANN, S RAMACHANDRAN, P.L. DA SILVA DIAS, S.C. WOFSY AND X. ZHANG, 2007: *Couplings Between Changes in the Climate System and Biogeochemistry*. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

LE QUÉRÉ C, RÖDENBECK C, BUITENHUIS ET, THOMAS J, CONWAY TJ, LANGENFELDS R, GOMEZ A, LABUSCHAGNE C, RAMONET M, NAKAZAWA T, METZL N, *et al.* (2007) *Science* 316:1735-1738.

LEHMANN J., GAUNT J., RONDON M. (2006). *Biochar sequestration in terrestrial ecosystems – A review. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 11:403–427 Springer 2006 DOI: 10.1007/s11027-005-9006-5.

SOMBROEK, W. G. (1992) *Biomass and Carbon. Storage in the Amazon ecosystems*. *Interiência* 17 (5) 269–272.

Sombroek, W., Ruivo, M.L., Fearnside, P.M., Glaser, B. and Lehmann J.: 2003, 'Dark Earths as carbon stores and sinks', in J. Lehmann, D.C. Kern, B. Glaser and W.I. Woods (eds.), *Amazonian Dark Earths: Origin, Properties, Management*, (pp. 125–139) Dordrecht, Kluwer Academic Publishers.

WARDLE D. NILSSON M.C., ZACKRISSON O. (2008). *Fire-Derived Charcoal Causes Loss of Forest Humus*. *Science* 320: 629.

WIKIPEDIA (2009). <http://en.wikipedia.org/wiki/Biochar>.

12.2 Capitolo 3

ACHARD F., EVA H.D., MAYAUX P., STIBIG H.G. AND BELWARD A. (2004). Improved estimates of net carbon emissions from land cover change in the tropics for the 1990s. *Global Biogeochem. Cycles* 18:GB2008, doi:10.1029/2003GB002142.

BOISVENUE C. AND RUNNING S.W. (2006). Impacts of climate change on natural forest productivity – evidence since the middle of the 20th century. *Global Change Biology* 12, 862–882.

BRUNETTI M., MAUGERIM., MONTIF. AND NANNIT. (2006). Temperatures and precipitation variability in Italy in the last two centuries from homogenised instrumental time series. *Int. J. Climatol.* 26: 345–381.

CANNELL M.G.R. (2003). Carbon sequestration and biomass energy offset: theoretical, potential and achievable capacities globally, in Europe and the UK. *Biomass and Bioenergy* 24:97–116.

CIAIS P. *et al.* (2005b): The potential for rising CO₂ to account for the observed uptake of carbon by tropical, temperate, and boreal forest biomes. In: *The Carbon Balance of Forest Biomes* [Griffiths, H., and P. G. Jarvis (edit.)]. Taylor and Francis, New York, pp. 109–150.

CIAIS P., REICHSTEIN M., VIOVY N., GRANIER A., OGÉE J., ALLARD V., AUBINET M., BUCHMANN N., BERNHOFER C., CARRARA A., CHEVALLIER F., NOBLET N.D., FRIEND A.D., FRIEDLINGSTEIN P., GRÜN WALD T., HEINESCH B., KERONEN P., KNOHL A., KRINNER G., LOUSTAU D., MANCA G., MATTEUCCI G., MIGLIETTA F., OURCIVAL J.M., PAPAIE D., PILEGAARD K., RAMBAL S., SEUFERT G., SOUSSANA J.F., SANZ M.J., SCHULZE E.D., VESALA T., VALENTINI R. (2005a). Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature* 437: 529–533.

DEL GALDO I., SIX J., PERESSOTTI A. AND COTRUFO M.F. (2003). Assessing the impact of land-use change on soil C sequestration in agricultural soils by means of organic matter fractionation and stable C isotopes. *Global Change Biology* 9: 1204–1213.

DENMAN, K.L., G. BRASSEUR, A. CHIDTHAISONG, P. CIAIS, P.M. COX, R.E. DICKINSON, D. HAUGLUSTAINE, C. HEINZE, E. HOLLAND, D. JACOB, U. LOHMANN, S. RAMACHANDRAN, P.L. DA SILVA DIAS, S.C. WOFSEY AND X. ZHANG (2007). Couplings Between Changes in the Climate System and Biogeochemistry. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor and H.L. Miller (edit.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

FAO (2001). *Global Forest Resources Assessment 2000. Main Report*. FAO, Forestry Paper.

GUO L.B. AND GIFFORD R.M. (2002). Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. *Global Change Biology* 8: 345-360.

HANSEN J., LACIS A., RUEDY R. AND SATO M. (1992). Potential climate impact of Mt. Pinatubo eruption. *Geophys. Res. Lett.* 19: 215-218.

HOUGHTON R.A. (2003). Revised estimates of the annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use and land management 1850-2000. *Tellus* 55B(2):378-390.

HOUSE J.I., PRENTICE C. AND LE QUERÉ C. (2002). Maximum impacts of future reforestation or deforestation on atmospheric CO₂. *Global Change Biology* 8: 1047 – 1052.

IPCC (2007). *Summary for Policymakers*. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor and H.L. Miller (edit.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

JUMP A.S., HUNT J.M., PEÑUELAS J. (2006). Rapid climate change-related growth decline at the southern range edge of *Fagus sylvatica*. *Global Change Biology* 12:2163-2174.

KEELING C.M., WHORT T.P., WAHLEN M., VANDER PLIGT J. (1995). International extremes in the rate of rise of atmospheric carbon dioxide since 1980. *Nature*, 375:666-670.

KIEHL J.T. AND TRENBERTH K.E. (1996). Earth's annual global mean energy budget. *Bull. Am. Met. Soc.* 78:197-208.

MAGNANI F., MENCUCCINI M., BORGHETTI M., BERBIGIER P., BERNINGER F., DELZON S., GRELE A., HARI P., JARVIS P.G., KOLARI P., KOWALSKI A.S., LANKREIJER H., LAW B.E., LINDROTH A., LOUSTAU D., MANCA G., MONCRIEFF J.B., RAYMENT M., TEDESCHI V., VALENTINI R., GRACE J. (2007). The human footprint in the carbon cycle of temperate and boreal forests. *Nature* 447:848-850.

MELILLO J.M., MCGUIRE A.D., KICKLIGHTER D.W., MOORE B., III, VOROSMARTY C.J., SCHLOSS A.L., (1993). Global climate change and terrestrial net primary production. *Nature* 363:234-240.

MENZEL A., ESTRELLA N., FABIAN P. (2001). Spatial and temporal variability of the phenological seasons in Germany from 1951 to 1996. *Global Change Biology* 7:657-666.

- MOLLICONE D., ACHARD F., FEDERICI S., EVA H.D., GRASSI G., BELWARD A., RAES F., SEUFERT G., STIBIG H.-J., MATTEUCCI G., SCHULZE E.-D. (2007) An incentive mechanism for reducing emissions from conversion of intact and non-intact forests. *Climatic Change* 83: 477-493 (DOI 10.1007/s10584-006-9231-2).
- MOLLICONE D., EVA H.D., ACHARD F. (2006). Human role in Russian wildfires. *Nature* 440:436-437.
- NADELHOFFER K.J., EMMETT B.J., GUNDERSEN P., KJÛNAAS O.J., KOOPMANSK C.J., SCHLEPPI P., TIETEMAK A. & WRIGHT R.F. (1999). Nitrogen deposition makes a minor contribution to carbon sequestration in temperate forests. *Nature* 398:145-148.
- NEMANI R.R., KEELING C.D., HASHIMOTO H., JOLLY W.M., PIPER S.C., TUCKER C.J., MYNENI R.B., RUNNING S.W. (2003). Climate-Driven Increases in Global Terrestrial Net Primary Production from 1982 to 1999. *Science* 300:1560-1563.
- NORBY R.J., DELUCIA E.H., GIELEN B., CALFAPIETRA C., GIARDINA C.P., KING J.S., LEDFORD J., MCCARTHY H.R., MOORE D.J.P., CEULEMANS R., DE ANGELIS P., FINZI A.C., KARNOSKY D.F., KUBISKE M.E., LUKAC M., PREGITZER K.S., SCARASCIA MUGNOZZA G.E., SCHLESINGER W.H., OREN R. (2005). Forest response to elevated CO₂ is conserved across a broad range of productivity. *PNAS-Proceedings of the National Academy of Sciences* 102:18052-18056.
- OSBORN T.J., BRIFFA K.R. (2006). The Spatial Extent of 20th-Century Warmth in the Context of the Past 1200 Years. *Science* 311:841-844.
- PAOLETTI E. AND GELLINI R. 1993 - Stomatal density variation in beech and holm oak leaves collected over the last 200 years. *Acta Oecologica* 14: 173-178.
- PARMESAN C. AND YOHE G. (2003). A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature* 421: 37-42.
- PAUL K.I., POLGLASE P.J., NYAKUENGAMA J.G., KHANNA P.K. (2002). Change in soil carbon following afforestation. *Forest Ecology and Management* 168: 241-257.
- PETIT J.R., JOUZEL J., RAYNAUD D., BARKOV N.I., BARNOLA J.-M., BASILE I., BENDER M., CHAPPELLAZ J., DAVIS M., DELAYGUE G., DELMOTTE M., KOTLYAKOV V.M., LEGRAND M., LIPENKOV V.Y., LORIEUS C., PÉPIN L., RITZ C., SALTZMAN E., STIEVENARD M. (1999). Climate and atmospheric history of the past 420'000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature* 399:429-436.
- PIAO S., FANG J., ZHOU L., CIAIS P, ZHU B. (2006). Variations in satellite-derived phenology in China's temperate vegetation. *Global Change Biology* 12:672-685.
- POMPEI E. (2006). Espansione delle foreste italiane negli ultimi 50 anni - il caso della Regione Abruzzo. *Dissertazione di Dottorato di ricerca in Ecologia forestale, Università della Tuscia, Viterbo.*
- RUDDIMAN W.F. (2003). The anthropogenic greenhouse era began thousands of years ago. *Climatic Change* 61:261-293.

SCARASCIA MUGNOZZA G., TIMARCO A., MATTEUCCI G. (2003). Ecosistemi forestali e cambiamenti ambientali: lo studio del bilancio idrologico e della produttività con tecniche innovative ed integrate. In: Atti Convegno Nazionale “Conservazione dell’ambiente e rischio idrogeologico”, Assisi (PG), 11-12 Dicembre 2002, CNR-IRPI-GNDICI, pubbl. 2830, Perugia, Italia, pp. 596-604.

SCARASCIA-MUGNOZZA G. (2006) Quale ruolo per alberi e foreste in uno scenario di cambiamenti ambientali. *Annali dell’Accademia Italiana di Scienze Forestali* 55: 31-55.

SCARASCIA-MUGNOZZA G., CALFAPIETRA C., CEULEMANS R., GIELEN B., COTRUFO M.F., P. DEANGELIS, GODBOLD D., HOOSBEEK M.R., KULL O., LUKAC M., MAREK M., MIGLIETTA F., POLLE A., RAINES C., SABATTI M., ANSELMINI N. AND TAYLOR G. (2006). Responses to elevated CO₂ of a short rotation, multispecies poplar plantation. In: *Managed ecosystems and CO₂: Case studies, processes and perspectives* (J. Noesberger, S.P. Long, R.J. Norby, M. Stitt, G.R. Hendrey, H. Blum eds.) *Ecological Studies* 187 - Springer Verlag, Berlin. pp. 173-195.

SCHIMEL D.S., HOUSE J.I., HIBBARD K.A., BOUSQUET P., CIAIS P., PEYLIN P., BRASWELL B.H., APPS M.J., BAKER D., BONDEAU A., CANADELL J., CHURKINA G., CRAMER W., DENNING A.S., FIELD C.B., FRIEDLINGSTEIN P., GOODALE C.L., HEIMANN M., HOUGHTON R.A., MELILLO J.M., MOORE B., III, MURDIYARSO D., NOBLE I.R., PACALA S.W., PRENTICE I.C., RAUPACH M.R., RAYNER P.J., SCHOLES R.J., STEFFEN W.L., WIRTH C. (2001). Recent patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems. *Nature* 414: 169-172.

SCHRÖTER D, CRAMER W, LEEMANS R (2005). Ecosystem service supply and vulnerability to global change in Europe. *Science* 310:1333 - 1337

SCHWARTZ M.D., AHAS R., ASSA A. (2006). Onset of spring starting earlier across the Northern Hemisphere. *Global Change Biology* 12:343–351,

SIEGENTHALER U., T. F. STOCKER, E. MONNIN, D. LÜTHI, J. SCHWANDER, B. STAUFFER, D. RAYNAUD, J.-M. BARNOLA, H. FISCHER, V. MASSON-DELMOTTE, J. JOUZEL. (2005). Stable Carbon Cycle-Climate Relationship During the Late Pleistocene. *Science* 310: 1313-1317.

SPIECKER H., MIELIKÄINEN K., KÖHL M. (2002). *Growth Trends in European Forests*. Springer, Berlin pp 372

VALENTINI R., DE ANGELIS P., MATTEUCCI G., MONACO R., DORE S., SCARASCIA MUGNOZZA G.E. (1996). Seasonal net carbon dioxide exchange of a Beech forest with the atmosphere. *Global Change Biology* 2:199-207.

VALENTINI R., G. MATTEUCCI, A. J. DOLMAN, E.-D. SCHULZE, C. REBMANN, E. J. MOORS, A. GRANIER, P. GROSS, N. O. JENSEN, K. PILEGAARD, A. LINDROTH, A. GRELE, C. BERNHOFER, T. GRÄNWALD, M. AUBINET, R. CEULEMANS, A. S. KOWALSKI, T. VESALA, ÅCE. RANNIK, P. BERBIGIER, D. LOUSTAU, J. GU MUNDSSON, H. THORGEIRSSON, A. IBROM, K. MORGENSTERN, R. CLEMENT, J. MONCRIEFF, L. MONTAGNANI, S. MINERBI, P. G. JARVIS (2000). Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests. *Nature* 404: 861 – 865.

VETTER M., WIRTH C., BÖTTCHER H., CHURKINA G., SCHULZE E.-D., WUTZLER T., WEBER G. (2005). Partitioning direct and indirect human-induced effects on carbon sequestration of managed coniferous forests using model simulations and forest inventories. *Global Change Biology* 11:810-827.

WOODWARD F.I. (1987b). Stomatal numbers are sensitive to increases in CO₂ from pre-industrial levels. *Nature* 327, 617-618.

WOODWARD F.I. (1987a). *Climate and plant distribution*. Cambridge University Press, Cambridge, Gran Bretagna.

ZERVA A. AND MENCUCCINI M., (2005). Carbon stock changes in a peaty gley soil profile after afforestation with Sitka spruce (*Picea sitchensis*). *Annals Forest Science* 62: 873-880.

12.3 Capitolo 4

ALBERTI G., INGLIMA I., ARRIGA N., PIERMATTEO D., PECCHIARI M., ZALDEI A., PAPALE D., PERESSOTTI A., VALENTINI R., COTRUFO M.F., MAGNANI F., MIGLIETTA F. (2007) Precipitation patterns changes in Mediterranean ecosystems: the MIND project. *Forest@*, 4 (4): 460-468.

APAT (2008). *Italian Greenhouse Gas Inventory 1990-2006*. National Inventory Report 2008. Agenzia per la protezione dell'ambiente e per i servizi tecnici, Roma. <http://www.apat.gov.it/>.

ARNONE J.A., PAUL S. J., VERBURG1 J., *et al.* (2008) Prolonged suppression of ecosystem carbon dioxide uptake after an anomalously warm year. *Nature*, 455: 383-386.

BALDOCCHI D. (2003) Assessing the Eddy Covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future. *Global Change Biology*, 9: 479-492.

BONAN G.B. (2008) *Forests and Climate Change: Forcings, Feedbacks and the Climate Benefits of forests*.

BOND-LAMBERTY B., WANG C. K., GOWER S. T. (2004) A global relationship between the heterotrophic and autotrophic components of soil respiration ? *Global Change Biology*, 10: 1756-1766.

BUCHMANN N. (2002) Plant ecophysiology and forest response to global change. *Tree Physiology*, 22: 1177-1184.

CAMPBELL J.L., ALBERTI G., MARTIN J., LAW B.E. (2009) Carbon dynamics of a Ponderosa pine plantation following fuel reduction treatment in the northern Sierra Nevada. *Forest Ecology and Management*, 257: 453-463.

CANNELL MRG, DEWAR RC (1994). Carbon allocation in trees: a review of concepts for modelling. *Advances in Ecological Research*, 25: 50-104.

COOPS, N.C., WARING, R.H. 2001. The use of a remote sensing imagery to derive regional estimates of forest growth capacity using 3-PGS. *Rem. Sens. of Env.* 75: 324-334.

- DAVIDSON E.A., SAVAGE K., VERCHOT L.V., NAVARRO R. (2002) Minimizing artefacts and biases in chamber-based measurements of soil respiration. *Agricultural and Forest Meteorology*, 113: 21–37.
- DELLE VEDOVE G., ALBERTI G., PERESSOTTI A., INGLIMA I., ZULIANI M., ZERBI G. (2007) Automated monitoring of soil respiration: an improved automatic chamber system. *Italian Journal of Agronomy*, 2 (4): 377-382.
- DORE S., HYMUS G.J., JOHNSON D.P., HINKLE C.R., VALENTINI R., DRAKE B.G. (2003) Cross validation of open-top chamber and Eddy Covariance measurements of ecosystem CO₂ exchange in a Florida scrub-oak ecosystem. *Global Change Biology*, 9: 84–95.
- EPRON D., LE DANTEC V., DUFRENE E. *et al.* (2001) Seasonal dynamics of soil carbon dioxide efflux and simulated rhizosphere respiration in a beech forest. *Tree Physiology*, 21: 145–152.
- FEDERICIS., VITULLO M., TULIPANO S., DE LAURETIS R., SEUFERT G. (2008). An approach to estimate carbon stocks change in forest carbon pools under the UNFCCC: the Italian case, *iForest -Biogeosciences and Forestry*. 1: 86-95. SISEF <http://www.sisef.it/iforest/>.
- FONTAINE S, BAROT S, BARRÈ P, BDIOUN M, MARY B, RUMPEL C (2007). Stability of organic carbon in deep soil layers controlled by fresh organic carbon supply. *Nature* 450: 277-281.
- FRANKLIN, S. E., LAVIGNE, M. B., DEULING, M. J., WULDER, M. A., & HUNT, R., JR. (1997). Estimation of forest Leaf Area Index using remote sensing and GIS data for modelling net primary production. *International Journal of Remote Sensing*, 18: 3459–3471.
- GIARDINA C. P., RYAN M. G. (2000) Evidence that decomposition rates of organic carbon in mineral soil do not vary with temperature. *Nature*, 404 (6780): 858–861.
- GOULDEN M.L., MUNGER J.W., FAN S.M., DAUBE, B.C., WOFSY S.C. (1996). Exchange of carbon dioxide by a deciduous forest: response of interannual climate variability. *Science*, 271: 1576–1578.
- GRECO S. BALDOCCHI D.D. (1996) Seasonal variations of CO₂ and water vapour exchange rates over a temperate deciduous forest., *Global Change Biology*, 2: 183-197.
- HANSON P.J., EDWARDS N.T., GARTEN C.T. *et al.* (2000) Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: a review of methods and observations. *Biogeochemistry*, 48, 115–146.
- HANSON P.J., WULLSCHLEGER S.D., BOHLMAN S.A., TODD S.E. (1993) Seasonal and topographic patterns of forest floor CO₂ efflux from an upland forest. *Tree Physiology*, 13: 1-5.
- HEIMANN M. REICHSTEIN M. (2008). Terrestrial ecosystem carbon dynamics and climate feedbacks. *Nature*, vol. 451: pp. 289 - 292.
- HUTCHINSON G.L., LIVINGSTON G.P. (2002) Gas flux in *Methods of Soil Analysis: Part 1. Physical Methods*. Edited by dane J.H. and Topp G.C., 3rd ed., pp. 1159-1182, soil Science Society of America, Madison, Wisconsin.

HYVONEN R., AGRE, G.I., LINDER S., PERSSON T., COTRUFO M.F., EKBLAD A., FREEMAN M., GRELE A., JANSSENS I.A., JARVIS P.G., KELLOMAKI S., LINDROTH A., LOUSTAUD., LUNDMARK T., NORBY R.J., OREN R., PILEGAARD K., RYAN M.G., SIGURDSSON B.D., STROMGREN M., VAN OIJEN M. AND WALLIN G. (2007) The likely impact of elevated [CO₂], nitrogen deposition, increased temperature and management on carbon sequestration in temperate and boreal forest ecosystems: a literature review. *New Phytologist*, 173: 463-480.

INGLIMA I., ALBERTI G., BERTOLINI T., VACCARI F.P., MIGLIETTA F., COTRUFO M.F., PERESSOTTI A. (in press) Precipitation pulses enhance respiration of Mediterranean ecosystems: the balance between organic and inorganic components of increased soil CO₂ efflux. *Global Change Biology*. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2008.01784.

IRVINE J., LAW B. E., KURPIUS M. R. (2005) Coupling of canopy gas exchange with root and rhizosphere respiration in a semi-arid forest. *Biogeochemistry*, 73 (1): 271-282.

IPCC 1997. Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Three volumes: Reference Manual, Reporting Guidelines and Workbook. IPCC/OECD/IEA. IPCC WG1 Technical Support Unit, Hadley Centre, Meteorological Office, Bracknell, UK.

IPCC 2003. Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry, www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gpglulucf/gpglulucf.htm.

JENSSENS I.A., LANKREIJER H., MATTEUCCI G., KOWALSKI A.S., BUCHMANN N. . (2001) Productivity overshadows temperature in determining soil and ecosystem respiration across European forests. *Global Change Biology*, 7: 269-278.

KELLIHER FM, LEUNING R, RAUPACH MR, SCHULZE ED (1995). Maximum conductances for evaporation from global vegetation types. *Agricultural and Forest Meteorology* 73: 1-16.

KNORR W., PRENTICE I. C., HOUSE J. I., HOLLAND E. A. (2005) Long-term sensitivity of soil carbon turnover to warming. *Nature*, 433 (7023): 298-301.

KUZYAKOV Y. (2006) Sources of CO₂ efflux from soil and review of partitioning methods. *Soil Biology & Biochemistry*, 38 (3): 425-448.

LANDSBERG, J.J., (2003). *Physiology in forest Models: History and the future*. FBMS Vol. 1.

LANDSBERG JJ, HINGSTON FJ (1996). Evaluating a simple radiation/dry matter conversion model using data from Eucalyptus globulus plantations in Western Australia. *Tree Physiology* 16: 801-808.

LANDSBERG, J.J., WARING, R.H. 1997. A generalized model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. *For. Ecol. Manage.* 95: 209-228.

LAW B.E., RYAN M.G., ANTHONI P.M. (1999). Seasonal and annual respiration of ponderosa pine ecosystem. *Global Change Biology*, 5: 169-182.

- LEUNING R, KELLIHER FM, DEPURY DGG, SCHULZE ED (1995). Leaf nitrogen, photosynthesis, conductance and transpiration- Scaling from leaves to canopies. *Plant Cell and Environment*, 18: 1183-1200.
- LIVINGSTON G.P., HUTCHINSON G.L. (1995) Enclosure-based measurement of trace gas exchange: applications and sources of error. In: Matson, P.A., Harriss, R.C. (Eds.), *Biogenic Trace Gases: Measuring Emissions from Soil and Water*. Blackwell Science, Cambridge, pp. 14–50.
- LONGDOZ, B., YERNAUX, M., AUBINET, M., (2000). Soil CO₂ efflux measurements in a mixed forest: impact of chamber distances, spatial variability and seasonal evolution. *Global Change Biology*, 6: 907–917.
- LUMICISI A., FEDERICI S., TEDESCHI V. (2008). Il Registro nazionale dei Serbatoi Forestali di Carbonio. *Silvae*. 9: 67-80.
- MAGNANI F., GRACE J., BORGHETTI M., (2002). Acclimation of coniferous tree structure to the environment under hydraulic constraints. *Functional Ecology*. 16, 385–393.
- MAGNANI F, MENCUCCINI M, GRACE J (2000). Age-related decline in stand productivity: the role of structural acclimation under hydraulic constraints. *Plant Cell and Environment* 23: 251-263.
- MAGNANI F., CONSIGLIO L., ERHARD M., NOLÈ A., RIPULLONE F., BORGHETTI M., (2004). Growth patterns and carbon balance of *Pinus radiata* and *Pseudotsuga menziesii* plantations under climate change scenarios in Italy. *Forest Ecology and Management*. 202, 93–105.
- MÄKELÄ, A., PULKKINEN, M., KOLARI, P., LAGERGREN, F., BERBIGIER, P., LINDROTH, A., LOUSTAU, D., NIKINMAA, E., VESALA, T., HARI, P. (2008). Developing an empirical model of stand GPP with the LUE approach: analysis of Eddy Covariance data at five contrasting conifer sites in Europe. *Global Change Biol*. 14: 92-108.
- MARINO C., MANCA G., MATTEUCCI G., SCARASCIA MUGNOZZA G.E., (2005). Cambiamenti climatici nel mediterraneo: un caso di studio sul ciclo del carbonio in una pineta della Sila, Calabria. *Forest@*, 2: 52-65.
- MCMURTRIE, R.E., H.L. GHOLZ, S. LINDER AND S.T. GOWER. (1994). Climatic factors controlling the productivity of pine stands: a modelbased analysis. *Ecol. Bull*. 43: 173—188.
- MONTEITH JL (1977). Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series B* 281: 277-294.
- PUMPANEN J., KOLARI P., ILVESNIEMI H., MINKKINEN K., VESALA T., NIINISTO S., LOHILA A., LARMOLA T., MORERO M., PIHLATIE M., JANSSENS I., YUSTE J. C., GRUNZWEIG J. M., RETH S., SUBKE J. A., SAVAGE K., KUTSCH W., OSTRENG G., ZIEGLER W., ANTHONI P., LINDROTH A., HARI P. (2004) Comparison of different chamber techniques for measuring soil CO₂ efflux. *Agricultural and Forest Meteorology*, 123 (3-4): 159-176.
- RAICH J.W., POTTER C.S. (1995) Global patterns of carbon dioxide emissions from soils. *Global Biogeochemistry Cycle*, 9: 23-36.

- RAICH J.W., SCHLESINGER W.H. (1992) The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus Series B*, 44, 81–99.
- RAICH J.W., TUFEKCIOGLU A. (2000) Vegetation and soil respiration: correlations and controls. *Biogeochemistry*, 45 (1): 71-90.
- REICHSTEIN M., REY A., FREIBAUER A., TENHUNEN J., VALENTINI R., *et al.* (2003) Modelling temporal and large-scale spatial variability of soil respiration from soil water availability, temperature and vegetation productivity indices. *Global Biogeochemical Cycles*, 17: 1104, doi:10.1029/2003GB002035.
- REICHSTEIN M., TENHUNEN J.D., ROUSPARD O., OURCIVAL J.M., RMABAL S., DORE S., VALENTINI R. (2002) Ecosystem respiration in two Mediterranean evergreen Holm oak forests: drought effects and decomposition dynamics. *Functional Ecology*, 16: 27-39.
- RUNNING, S. W, NEMANI, R. R, HEINSCH, F., ZHAO, M., REEVES, M. C., HASHIMOTO, H. (2004). A continuous satellite-derived measure of global terrestrial primary production. *Bioscience*, 54: 547–560.
- SAMPSON D.A., JANSSENS I.A., CURIEL YUSTE J., CEULEMANS R. (2007) Basal rates of soil respiration are correlated with photosynthesis in a mixed temperate forest. *Global Change Biology*, 13: 2008-2017.
- SANTANTONIO D (1989). Dry-matter partitioning and fineroot production in forests - new approaches to a difficult problem. In: “Biomass production by fast-growing trees” (Pereira JS, Landsberg JJ eds). Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA, pp. 57-72.
- SHIMEL D.S. (1995) Terrestrial ecosystems and the carbon-cycle. *Global Change Biology*, 1, 77–91.
- SUBKE J. A., INGLIMA I., COTRUFO M. F. (2006) *Trends* and methodological impacts in soil CO₂ efflux partitioning: a meta-analytical review. *Global Change Biology*, 12 (6): 921-943.
- SWINBANK WC. (1951) The measurement of vertical transfer of heat and water vapor by eddies in the lower atmosphere. *Journal of Meteorology*, 8: 135-145.
- TANG J., QI Y., XU M., MISSON L., GOLDSTEIN A. H. (2005) Forest thinning and soil respiration in a ponderosa pine plantation in the Sierra Nevada. *Tree Physiology*, 25 (1): 57-66.
- TEDESCHI V., REY A., MANCA G., VALENTINI R., JARVIS P. G., BORGHETTI M. (2006) Soil respiration in a Mediterranean oak forest at different developmental stages after coppicing. *Global Change Biology*, 12 (1): 110-121.
- TICKLE, P.K., COOPS, N.C., HAFNER, S.D., THE BAGO SCIENCE TEAM. (2001). Assessing Forest Productivity at local scales across a native eucalypt forest using a process model, 3PG-SPATIAL. *For. Ecol. Manage.* 152: 275-291.
- TRUMBORE S. (2006) Carbon respired by terrestrial ecosystems - Recent progress and challenges. *Global Change Biology*, 12 (2): 141-153.
- WARING RH, LANDSBERG JJ, WILLIAMS M (1998). Net primary production of forest: a constant fraction of grass primary production? *Tree Physiology* 18: 129-134.

WOODWELL G.M., MACKENZIE F.T., HOUGHTON R.A. *et al.* (1998) Biotic feedbacks in the warming of the earth. *Climate Change*, 40: 495-518.

XU M., QI Y. (2001) Soil surface CO₂ efflux and its spatial and temporal variations in a young ponderosa pine plantation in northern California. *Global Change Biology*, 7: 667-677.

12.4 Capitolo 5

ACHARD F., DEFRIED R., EVA H., HANSEN M., MAYAUX P., STIBIG., H-J, (2007). Pan-tropical monitoring of deforestation. *Environ. Res. Lett.* 2 (October-December 2007) 045022.

http://www.iop.org/EJ/article/1748-9326/2/4/045022/erl7_4_045022.html#erl257163bib13 (luglio 2009).

CAPOOR K., P.AMBROSI, (2007). State and *Trends* of the Carbon Market 2008. World Bank, Washington.

<http://web.worldbank.org/WBSITE/EXTERNAL/TOPICS/ENVIRONMENT/EXTCARBONFINANCE/0,,menuPK:4125909~pagePK:64168427~piPK:64168435~theSitePK:4125853,00.html> (luglio 2009).

CICCARESE L., D. PETTENELLA, G. ZANCHI, (2006). Il settore primario e la riduzione delle emissioni di gas ad effetto serra. Tra strumenti diretti di compensazione e politiche generiche di sostegno del settore. *Politica Agricola Internazionale*, n. 5, pp. 27-48.

DENMAN, K., BRASSEUR G., (2007). Couplings between changes in the climate system and biogeochemistry *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press. Disponibile al sito (dicembre 2008): <http://www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-wg1.htm>.

FAO, (2006). Global Forest Resources Assessment update 2005. FAO, Rome, Italy. <http://www.fao.org/forestry/site/fra2005/en/> (luglio 2009).

HAMILTON K., SJARDIN M., MARCELLO T., XU G., (2008). Forging a Frontier: state of the voluntary carbon markets 2008. A reportt by Ecosystem Markettpllace & New Carbon Fiiinance. Washington, New York. http://ecosystemmarketplace.com/pages/article.news.php?component_id=5794&component_version_id=8481&language_id=12 (luglio 2009).

PRENTICE C., HEIMANN M., SITCH S., (2000). The carbon balance of the terrestrial biosphere: ecosystem models and atmospheric observations. *Ecological Applications*: 10 (6): 1553-1573.

SAUERBECK D.R., (2001). CO₂ emissions and C sequestration by agriculture – perspectives and limitations. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 60: 253-266.

THE FOREST DIALOGUE (TFD), 2008. Beyond REDD: The Role of Forests in Climate Change. TFD publication n.3 2008.

http://unfccc.int/methods_science/redd/items/4619txt.php (luglio 2009).

UNFCCC, (2007). Investment and Financial Flows to Address Climate Change. United Nations Framework Convention on Climate Change, Bonn, Germany.

http://unfccc.int/cooperation_and_support/financial_mechanism/items/4053.php (luglio 2009).

12.5 Capitolo 6

CBD TS 10, (2003) – Interlinkages between biological diversity and climate change – UN ISBN 92-807-2389-8.

DEWAR C.D. (1991), Analytical model of carbon storage in the trees, soil, and wood products of managed forest. – *Tree Physiology* 8, 239-258.

FIORAVANTI M, FRANKL P., (2002) – Il ruolo dei prodotti legnosi come serbatoio di carbonio: situazione e prospettive – *I Georgofili Quaderni VIII* 89-103.

HARMON M.E., FERREL W.K., FRANKLIN J.F. (1990), Effect on carbon storage of conversion of old-growth forest to young forest – *Science* 247 : 699-702.

HASHIMOTO S., NOSE M., OBARA T., MORIGUCHI Y. (2002), Wood Products: potential carbon sequestration and impact on net emission of industrialised countries. *Environmental Science and Policy* 5 (183-193).

LATURI J., MIKKOLA J., UUSIVUORI J., (2008) - Carbon reservoirs in wood products in use in Finland: current sinks and scenarios until 2050 , *Silva Fennica Vol 42(2)* 307-324.

12.6 Capitolo 7

AMORUSO A., LUISI N., SANESI G., (2005). Prime valutazioni su alcuni impianti di arboricoltura realizzati in Puglia nell'ambito della campagna 1994/96 del Reg. CEE 2080/92. *L'Italia Forestale e Montana*. vol. 3, pp. 293-316.

ANDERLE A., CICCARESE L., DAL BON D., PETTENELLA D., ZANOLINI E. (2002) – Assorbimento e fissazione di carbonio nelle foreste e nei prodotti legnosi in Italia. Rapporti APAT - Agenzia per per la protezione dell'ambiente e per i servizi tecnici.

BIANCHI M., (2005) – *Le linee tecniche dell'INFC: un primo bilancio*. “Conoscere e difendere i boschi” Incontro organizzato da Osservatorio Foreste e Ambiente, Corpo Forestale dello Stato, Regione Toscana, Associazione Forestale Italiana, Consulta Nazionale Foreste Legno Carta. 9 – 10 giugno 2005, Abbazia di Vallombrosa, Firenze.

BISOFFI S., MINOTTA G., PARIS P. (2008) Indirizzi colturali e valorizzazione delle produzioni legnose fuori foresta. Nota presentata al III Congresso Nazionale di Selvicoltura, Taormina (ME), 16-19 ottobre 2008.

12. Bibliografia

CORONA P. (2003) – Il pino insigne (*Pinus radiata* D. Don). In L'arboricoltura da legno: un'attività produttiva al servizio dell'ambiente (a cura di G. Minotta). Ed. Avenue Media, Bologna: 58-61.

CORONA P., FERRETTI M., TABACCHI G., (2001) – *Riflessioni sugli aspetti campionari nella valutazione e monitoraggio delle risorse ambientali*. Comunicazioni di Ricerca dell'ISAF 2001/2, Trento.

CORONA P., FERRETTI M., TABACCHI G., (2001) – *Riflessioni sugli aspetti campionari nella valutazione e monitoraggio delle risorse ambientali*. Comunicazioni di Ricerca dell'ISAF 2001/2, Trento.

DE NATALE F., (2004) – *La prima fase del campionamento inventariale. Procedure e risultati*. Corpo Forestale dello Stato, Incontro con le Amministrazioni regionali su Obiettivi, metodologie e stato di avanzamento dell'INFC. Palazzo Rospigliosi, Roma.

DEL GALDO I., SIX J., PERESSOTTI A., COTRUFO M.F., (2003) Assessing the impact of land-use change on soil C sequestration in agricultural soils by means of organic matter fractionation and stable C isotopes. *Global Change Biology*, 9: 1204–1213.

DI VAIO C., MINOTTA G. (2005). Indagine sulla coltivazione del noce da legno in Campania. *Forest@ 2* (2): 185-197. [online] URL: <http://www.sisef.it/>.

FAO, (2010) – *Global Forest Resources Assessment 2010*. FAO Forestry Department, in corso di preparazione.

FEDERICIS., VITULLO M., TULIPANO S., DE LAURETIS R., SEUFERT G. (2008). An approach to estimate carbon stocks change in forest carbon pools under the UNFCCC: the Italian case, *iForest -Biogeosciences and Forestry*. 1: 86-95. SISEF <http://www.sisef.it/iforest/>.

GEMIGNANI G. (2000) – La coltivazione degli eucalitti in ambiente mediterraneo. In *Arboricoltura da legno quale futuro?* (a cura di S. Dettori e M.S. Filigheddu). Accademia Italiana di Scienze Forestali, Dipartimento di Economia e Sistemi Arborei dell'Università di Sassari, Sassari: 61-75.

http://www.sian.it/inventarioforestale/doc/INFC_I%20caratteri%20quantitativi_versione3_rid.pdf.

INFC (2005) – *Inventario Nazionale delle Foreste e dei Serbatoi Forestali di Carbonio*. Ministero delle Politiche Agricole e Forestali, Corpo Forestale dello Stato, Roma.

INFC, (2004a) – *Il disegno di campionamento*. Autori L. Fattorini, G. Tabacchi. Inventario Nazionale delle Foreste e dei Serbatoi Forestali di Carbonio. MiPAF – Ispettorato Generale, Corpo Forestale dello Stato, CRA – ISAF, Trento. [on line] URL: <http://mpf.entecra.it/?q=node/1319>.

INFC, 2004b – *Istruzioni per il rilievo degli attributi di seconda fase*. Autori P. Gasparini, V. Tosi. Inventario Nazionale delle Foreste e dei Serbatoi Forestali di Carbonio. MiPAF – Direzione Generale Risorse Forestali Montane Idriche, Corpo Forestale dello Stato, CRA – ISAF, Trento. [on line] URL: <http://mpf.entecra.it/?q=node/1318>.

INFC, (2004c) – *Procedure di individuazione, materializzazione e ritrovamento dei punti di campionamento*. Autori L. CAVINI, G. SCRINZI, A. FLORIS. Inventario Nazionale delle Foreste e dei Serbatoi Forestali di

Carbonio. MiPAF – Direzione Generale Risorse Forestali Montane Idriche, Corpo Forestale dello Stato, CRA – ISAFSA, Trento. [on line] URL: <http://mpf.entecra.it/?q=node/1320>.

INFC, (2005) – *Linee generali del progetto per il secondo inventario forestale nazionale italiano*. Autori F. DE NATALE, A. FLORIS, P. GASPARINI, G. SCRINZI, G. TABACCHI, V. TOSI. Inventario Nazionale delle Foreste e dei Serbatoi Forestali di Carbonio. MiPAF – Ispettorato Generale, Corpo Forestale dello Stato, CRA – ISAFSA, Trento. [on line] URL: <http://mpf.entecra.it/?q=node/647>.

INFC, (2007) – *Le stime di superficie 2005 – Prima parte*. Autori G. TABACCHI, F. DE NATALE, L. DI COSMO, A. FLORIS, C. GAGLIANO, P. GASPARINI, L. GENCHI, G. SCRINZI, V. TOSI. Inventario Nazionale delle Foreste e dei Serbatoi Forestali di Carbonio. MiPAAF – Ispettorato Generale, Corpo Forestale dello Stato, CRA – ISAFSA, Trento. [on line]: http://www.sian.it/inventarioforestale/doc/INFC_Stime_di_superficie_I_parte.pdf.

INFC, (2008a) – *Le stime di superficie 2005 – Seconda parte*. Autori G. TABACCHI, F. DE NATALE, L. DI COSMO, A. FLORIS, C. GAGLIANO, P. GASPARINI, I. SALVADORI, G. SCRINZI, V. TOSI. Inventario Nazionale delle Foreste e dei Serbatoi Forestali di Carbonio. MiPAAF – Ispettorato Generale, Corpo Forestale dello Stato, CRA – ISAFSA, Trento. [on line]: http://www.sian.it/inventarioforestale/doc/INFC_Stime_di_superficie_II_parte.pdf.

INFC, (2008b) – *Le stime di superficie 2005 – Risultati per Macroaree e per Province*. Autori P. GASPARINI, L. DI COSMO, C. GAGLIANO, G. MATTIUZZO, G. TABACCHI. Inventario Nazionale delle Foreste e dei Serbatoi Forestali di Carbonio. MiPAAF – Ispettorato Generale, Corpo Forestale dello Stato, CRA – ISAFSA, Trento. [on line] URL: http://www.sian.it/inventarioforestale/doc/Macroaree_province.pdf.

INFC, (2008c) – *Le stime di superficie 2005 – Risultati per combinazioni di variabili qualitative*. Autori P. GASPARINI, L. DI COSMO, C. GAGLIANO, G. MATTIUZZO, G. TABACCHI. Inventario Nazionale delle Foreste e dei Serbatoi Forestali di Carbonio. MiPAAF – Ispettorato Generale, Corpo Forestale dello Stato, CRA – ISAFSA, Trento. [on line]: http://www.sian.it/inventarioforestale/doc/INFC_stime_sup_incroci_completo_def_rid.pdf.

INFC, (2008d) – *I caratteri quantitativi 2005 – Prima parte*. Autori P. GASPARINI, F. DE NATALE, L. DI COSMO, C. GAGLIANO, I. SALVADORI, G. TABACCHI, V. TOSI. Inventario Nazionale delle Foreste e dei Serbatoi Forestali di Carbonio. MiPAAF – Ispettorato Generale, Corpo Forestale dello Stato, CRA – MPF, Trento. [on line]: http://www.sian.it/inventarioforestale/doc/INFC_I%20caratteri%20quantitativi_versione3_rid.pdf.

MAGNANI F., GRASSI G., TONON G., CANTONI L., PONTI F., VICINELLI E., BOLDREGHINI P., NARDINO M., GEORGIADIS T., FACINI O., ROSSI F. (2005) - *Quale ruolo per l'arboricoltura da legno italiana nel protocollo di Kyoto? Indicazioni da una "Kyoto forest" della pianura emiliana*. *Forest@ 2* (4): 333-344. [online] URL: <http://www.sisef.it/>.

MCPFE, (2007) - *State of Europe's Forests 2007. The MCPFE report on sustainable forest management in Europe*, Jointly prepared by the MCPFE Liaison Unit Warsaw, UNECE and FAO, Warsaw 2007, 263 p.

MERCURIO R., MINOTTA G. (2000) - *Arboricoltura da legno*. Ed. CLUEB, Bologna: 203 pp.

Ministero dell'Ambiente (2002). Terza comunicazione Nazionale dell'Italia alla Convenzione Quadro sui Cambiamenti Climatici. Ministero dell'Ambiente, Roma pp. 252.

MINOTTA G. (2007) – L'arboricoltura da legno di qualità per un basso impatto ambientale. In “Nuove frontiere dell'arboricoltura italiana” (a cura di S. Sansavini), Alberto Perdisa Ed., Bologna: 535-544.

NABUURS G.J., SIKKEMA R. (1998) - The role of harvested wood products in national carbon balances – an evaluation of alternatives for IPCC guidelines. Institute for forestry and nature research (IBN-DLO). IBN-Research Report 98/3.

PETTENELLA D. (2008) Prospettive economiche delle filiere per l'arboricoltura da legno in Italia. Atti del Convegno: “L'Arboricoltura nella filiera del legno pregiato” (a cura di M.C. Piagnani), Cornaredo - Milano 5-6 ottobre 2006: 45-63.

POULTON P.R., PYE E., HARGRAVES P.R., JENKINSON D.S. (2003) Accumulation of carbon and nitrogen by old arable land reverting to woodland. *Global Change Biology*, 9: 942-955.

Protezione dell'Ambiente e per i Servizi Tecnici 21/2002, Roma, pp. 58.

SANCHEZ F. G., COLEMAN M., GARTEN C.T. JR., LUXMOORE R.J., STANTURF J.A., TRETTIN C., WULLSCHLEGER S.D. (2007) - Soil carbon, after 3 years, under short-rotation woody crops grown under varying nutrient and water availability. *Biomass and Bioenergy*, 31: 793–801.

TABACCHI G., (2004) – Il disegno dell'inventario forestale nazionale. Corpo Forestale dello Stato, Incontro con le Amministrazioni regionali su Obiettivi, metodologie e stato di avanzamento dell'INFC. Palazzo Rospigliosi, Roma.

TABACCHI G., DE NATALE F., FLORIS A., GAGLIANO C., GASPARINI P., SCRINZI G., TOSI V., (2005a) – Italian National Forest Inventory: methods, state of the project and future developments. 7th Annual Forest Inventory and Analysis Symposium, 3-6 October 2005, Portland (ME), USA.

TABACCHI G., DE NATALE F., FLORIS A., GASPARINI P., SCRINZI G., TOSI V., (2005b). The new Italian National Forest Inventory: a multi-source and multi-resource survey. IUFRO Congress, 8-13 August 2005, Brisbane, Australia.

UN-ECE/FAO, (1997). *Temperate and Boreal Forest Resources Assessment 2000. Terms and Definitions*. United Nations, New York and Geneva.

12.7 Capitolo 8

APAT, (2002). Assorbimento e fissazione di carbonio nelle foreste e nei prodotti legnosi in Italia. A cura di Anderle A., Ciccarese L., Dal Bon D., Pettenella D., Zanolini E., Rapporti 21, Roma.

CEC, (2006). Communication from the Commission to the Council and the European Parliament on an EU Forest Action Plan. Commission of the European Communities, Com 302 final, Brussels.

CIANCIO O., CORONA P., IOVINO F., MENGUZZATO G., SCOTTI R., (1999). Forest management on a natural basis: the fundamentals and case studies. *Journal of Sustainable Forestry* 1/2: 59-72.

CORONA P., (1993). Applying biodiversity concepts to plantation forestry in northern Mediterranean landscapes. *Landscape and Urban Planning* 24: 23-31.

CORONA P., IOVINO F., LUCCI S., (1996). La gestione dei sistemi forestali nella conservazione del suolo. *EM-Linea Ecologica* 4: 4-15.

CORONA P., FERRARA A., LA MARCA O., (1997). Sustainable management of forests for atmospheric CO₂ depletion: the Italian case. *Journal of Sustainable Forestry* 3/4: 81-91.

CORONA P., CALVANI P., MUGNOZZA SCARASCIA G., POMPEI E., (2008). Modelling natural forest expansion on a landscape level by multinomial logistic regression. *Plant Biosystems* 142: 509-517.

FAO, (2004). Climate change and the forest sector. *Forestry Paper 144*, Roma.

FAO, (2005). State of the world's forests. FAO, Roma.

INFC, (2007) – Le stime di superficie 2005. Inventario Nazionale delle Foreste e dei Serbatoi Forestali di Carbonio. MiPAF – Ispettorato Generale Corpo Forestale dello Stato, CRA - ISAF, Trento. <http://www.infc.it>.

12.8 Capitolo 9

ALBERTI G., MARELLI A., PIOVESANA D., PERESSOTTI A., ZERBI G., GOTTARDO E., BIDESE F., (2006). Accumulo di carbonio e produttività delle piantagioni legnose (Kyoto forests) del Friuli Venezia Giulia. *Forest@ 3* (4): 488-495.

[http://www.sisef.it/forest@/showPaper.php?action=html\(10,414\)](http://www.sisef.it/forest@/showPaper.php?action=html(10,414)) (giugno 2009):

BURSHEL P., KURSTEN E., LARSON B.C., (1993). Die Rolle von Wald und Forstwirtschaft im Kohlenstoffhaushalt Eine Betrachtung für die Bundesrepublik Deutschland. *Forstliche Forschungsberichte*, 126 München.

ANFODILLO T., DALLA VALLE E., LA MEDICA S., (2007). Ruolo delle foreste nel Veneto nella fissazione di CO₂ in relazione alle norme del Protocollo di Kyoto. Regione del Veneto: pp. 92.

CEE, 2005. Reg. (CE) 1968/05.

http://www.agricoltura.regione.lombardia.it/sito/tmp1_action.asp?DocumentoId=1854&SezioneId=2305020100&action=Documento.

CICCARESE L., AVITABILE V., BROWN S., PETTENELLA D., SCHLAMADINGER B., (2003). Possono le foreste mitigare i cambiamenti climatici? *Sherwood – Foreste ed Alberi Oggi* 94 (10): 26-30.

12. Bibliografia

CORONA, P., POMPEI, E., SCARASCIA MUGNOZZA, G., (2005). Stima probabilistica del tasso di espansione annua e del valore al 1990 della superficie forestale nella Regione Abruzzo. *Forest@ 2*: 178-184.

[\(http://www.sisef.it/forest@/showPaper.php?action=html\(4,283\)\)](http://www.sisef.it/forest@/showPaper.php?action=html(4,283)) (giugno 2009).

MARLAND G., FRUIT K., SEDJO R., (2001). Accounting for sequestered carbon: the question of permanence. *Environmental Science and Policy 4*: 259-268.

MAGNANI F., GRASSI G., TONON G., CANTONI L., PONTI F., VICINELLI E., BOLDREGHINI P., NARDINO M., GEORGIADIS T., FACINI O., ROSSI F., (2005). Quale ruolo per l'arboricoltura da legno italiana nel protocollo di Kyoto? Indicazioni da una "Kyoto forest" della pianura emiliana. *Forest@ 2 (4)*: 333-344. [\(http://www.sisef.it/forest@/showPaper.php?action=html\(6,320\)\)](http://www.sisef.it/forest@/showPaper.php?action=html(6,320)) (luglio 2009).

Mori P., 1996. Riflessioni e orientamenti per un'arboricoltura da legno economicamente sostenibile. *Sherwood 16(9)*: 13-18.

POULTON P.R., PYE E., HARGREAVES P.R, JENKINSON D.S., (2003). Accumulation of carbon and nitrogen by old arable land reverting to woodland. *Global Change Biology 9*: 942-955.

REGIONE LOMBARDIA, (2009). Programma di sviluppo rurale 2007-2013. pp. 307.

[\(http://www.agricoltura.regione.lombardia.it/sito/tmpl_action.asp?DocumentoId=3289&SezioneId=250000000&action=Documento\)](http://www.agricoltura.regione.lombardia.it/sito/tmpl_action.asp?DocumentoId=3289&SezioneId=250000000&action=Documento) (luglio 2009).

F.SOTTE (ed.), (2009). La politica di sviluppo rurale 2007-2013. Un primo bilancio per l'Italia. Ed. Tellus.

[\(http://www.gruppo2013.it/quaderni/Pagine/default.aspx\)](http://www.gruppo2013.it/quaderni/Pagine/default.aspx) (luglio 2009).

UFAM, (2006). Serbatoi di carbonio nell'economia forestale. Ufficio Federale dell'Ambiente, Berna, Svizzera.

[\(http://www.waldwissen.net/themen/umwelt_landschaft/co2_klimaschutz/wsl_co2senken_IT\)](http://www.waldwissen.net/themen/umwelt_landschaft/co2_klimaschutz/wsl_co2senken_IT) (luglio 2009).

VESTERDAL L., ROSENQVIST L., VAN DER SALM C., GROENENBERG B.J., HANSEN K., (2003). Soil and biomass carbon sequestration in afforestation chronosequences in Denmark, Sweden and the Netherlands. 5th E21 Cost Action meeting. Thessaloniki, Greece, November 27-29, 2003.

ZENONE T., SEUFERT G., MIGLIAVACCA M., MONTAGNANI L., MATTEUCCI G., MERON M., COLOMBO R., (2007). Carbon sequestration in Short rotation forestry and traditional plantation of poplar: the Jrc Kyoto experiment. In Workshop: "Ecophysiology, Biology and Genetics of Poplar: State of Research in Italy." Sesto Fiorentino (FI, Italy) – Maggio 25, 2007 - Forest@.

12.9 Capitolo 10

ALBERTI G., PERESSOTTI A., PIUSSI P., ZERBI G. (2008) Forest ecosystem carbon accumulation during a secondary succession in the Eastern Prealps of Italy. *Forestry*, 81: 1-10.

BRAVO F. (coordinatore), (2007). El papel de los bosques españoles en la mitigación del cambio climático. Fundació Gas Natural;

BROWN S., (2002). Measuring carbon in forests: current status and future challenges, *ENVIRONMENTAL POLLUTION* 116: 363–372.

BULLOCK J. (1996) Plants. In: Sutherland W.J. 1996 [Ed.] *Ecological census techniques. A handbook*, Cambridge University Press, Cambridge pp 111-138.

CAIRNS M.A., BROWN S., HELMER E.H., BAUMGARDNER G.A. (1997). Root biomass allocation in the world's upland forests *Oecologia* 111:1-11.

CALFAPIETRA B., GIELEN A. N. J., GALEMA M., LUKAC P., DE ANGELIS, MOSCATELLI M. C., CEULEMANS R. & G. SCARASCIA-MUGNOZZA, (2003). Free-air CO₂ enrichment (FACE) enhances biomass production in a short-rotation poplar plantation. *TREE PHYSIOLOGY* 23, 805–814.

CASADO M. A., CASTRO I., RAMÍREZ-SANZ L., COSTA-TENORIO M., DE MIGUEL J. M. & F. D. PINEDA, (2004). Herbaceous plant richness and vegetation cover in Mediterranean grasslands and shrublands. *PLANT ECOLOGY* 170: 83–91.

CASTELLANI, C.; GHIDINI, G.; TOSI, V. (1982). Tavole dendrometriche ed alsometriche del Pino d'Aleppo (*Pinus halepensis* Mill.) valedoli in Italia. *Annali Istituto Sperimentale Assesamento Forestale e Alpicoltura* 1980-82, Volume VIII, p.5-44 (1982).

COOMES D. A., ALLENA R. B., SCOTT B. N. A., GOULDING C. C. & P. BEETS, (2002). Designing systems to monitor carbon stocks in forests and shrublands. *FOREST ECOLOGY AND MANAGEMENT* 164: 89–108.

COSTA G. & T. LA MANTIA, (2005). Il ruolo della macchia mediterranea nel sequestro del carbonio, *FOREST@* 2 (4): 378-387.

FEDERICI S., VITULLO M., TULIPANO S., DE LAURETIS R., SEUFERT G. (2008). An approach to estimate carbon stocks change in forest carbon pools under the UNFCCC: the Italian case, *i Forest - Biogeosciences and Forestry*. 1: 86-95. SISEF <http://www.sisef.it/iforest/>.

HIERRO J. L., BRANCH L. C., VILLARREAL D. & L. KENNETH. CLARK, (2000). Predictive equations for biomass and fuel characteristics of Argentine shrubs. *JOURNAL OF RANGE MANAGEMENT* 53(6):617–621.

HIGGINS KB, LAMB AJ, WILGEN BW van (1987). Root systems of selected plant species in mesic fynbos in the Jonkershoek Valley, south-western Cape Province. *S Afr J Bot* 53:249-257.

HOOKE T.D., COMPTON J.E. (2003) Forest ecosystem carbon and nitrogen accumulation during the first century after agricultural abandonment. *Ecological Applications* 13 (2): 299-313.

HOUGHTON R.A., GOODALE C.L. (2004) Effects of land-use change on carbon balance of terrestrial ecosystems. In: Ecosystems and land use change. DeFries R., Asner G., Houghton R.A. eds. American Geophysical Union, Washington DC.

JACKSON R.B., CANADELL J., EHLERINGER J.R., MOONEY H.A., SALA O.E., SCHULZE E.D. (1996). A global analysis of root distribution for terrestrial biomes. *Oecologia* 108:389-411.

JIN Z., QI Y. & Y. DONG, (2007). Storage of biomass and net primary productivity in desert shrubland of *Artemisia ordosica* on Ordos Plateau of Inner Mongolia, China. *JOURNAL OF FORESTRY RESEARCH*, 18(4): 298-300.

KREBS C.J. (1999) Ecological methodology, 2nd edition, Addison-Wesley, Menlo -park, CA.

KUMMEROW J (1981) Structure of roots and root systems. In: Castri F di, Goodall Dw, Specht RL (eds) Mediterranean-Type Shrublands, Elsevier, New York, pp 269-288.

KUMMEROW J, KRAUSE D, JOW W (1977) Root systems of chaparral shrubs. *Oecologia* 29: 163-177.

LA MANTIA T. & A. Lumicisi, 2006. Il bosco alleato del clima. *QUALENERGIA IV - N.3* (maggio-giugno): 25-28.

MAETZKE F., T. La Mantia, 2007. Produzione e utilizzazione delle biomasse dei rimboschimenti in Sicilia. *ITALIA FORESTALE E MONTANA*, 5-6:437-451.

MINUNNO F., 2009. Parameterisation, validation and application of 3-PGN for Sitka spruce across Scotland: spatial predictions of forest carbon balance using a simplified process based model. MRes thesis, University of Edinburgh.

MONSER U., ALBANI L., PIUSSI P. (2003) Rimboschimento spontaneo di terreni agricoli abbandonati nelle Prealpi Giulie (Friuli, Italia). *Gortania* 25: 207-231.

MOONEY, H. A., and D. J. PARSONS: Structure and Function of the California Chaparal – an Example from San Dimas. *Ecological Studies 7 Mediterranean Type Ecosystems*: pp 83-120.

NAVARRO CERRILLO R. M. & P. BLANCO OYONARTE, 2006. Estimation of above-ground biomass in shrubland ecosystems of southern Spain, *INVESTIGACIONES AGRARIAS: SISTEMAS Y RECURSOS FORESTALES*, 15(2): 197-207.

NOLÈ A, 2008. Stima del turnover delle radici fini. Verso una revisione del bilancio globale del carbonio? *FOREST@ 5*: 5-6.

SCHLESINGER D.S. (1990) Evidence from chronosequence studies for a low carbon storage potential of soils. *Nature* 348: 232-234.

SCHLESINGER (1991).

SOFO A., NUZZO V., PALESE A. M., XILOYANNIS C., CELANO G., ZUKOWSKYJ P. & B. DICHIO, 2005. Net CO₂ storage in mediterranean olive and peach orchards. *SCIENTIA HORTICULTURAE* 107:17–24.

SPECHTA A. & P.W. WESTA, 2003. Estimation of biomass and sequestered carbon on farm forest plantations in northern New South Wales, Australia. *BIOMASS AND BIOENERGY* 25: 363 – 379.

STERNBERG M. & M. SHOSHANY, 2001. Aboveground biomass allocation and water content relationships in Mediterranean trees and shrubs in two climatological regions in Israel. *PLANT ECOLOGY* 157: 171–179.

VERWIJST T. & B. TELENIUS, 1999. Biomass estimation procedures in short rotation forestry, *FOREST ECOLOGY AND MANAGEMENT* 121: 137-146-

XENAKIS G., RAY D., MENCUCCINI M., 2008. Sensitivity and uncertainty analysis from a coupled 3-PG and soil organic matter decomposition model. *Ecological modelling*, 219, 1-16.

ZIANIS D. AND MENCUCCINI M., 2004. On simplifying allometric analyses of forest biomass. *Forest Ecology and Management*. 187: 311 - 332.

12.10 Capitolo 11

ISPRA, (2009). *Annuario dei dati ambientali 2008*. Ispra, Roma.



13

Glossario

Advezione: Fenomeno fisico che consiste nel movimento sul piano orizzontale di aria con caratteristiche termodinamiche (temperatura, contenuto in vapore acqueo, ecc.) diverse da quelle dell'aria che incontra lungo il suo percorso.

Agro-selvicoltura: Sistema colturale che associa molteplici sistemi produttivi e di uso primario del territorio per cui si verifica la consociazione di piante legnose e colture erbacee e/o attività di allevamento secondo un'organizzazione consociativa sia spaziale che sequenziale al fine di garantire delle significative interazioni economiche e/o ecologiche a vantaggio dell'azienda agricola.

Arboricoltura da legno: Disciplina tecnica che si occupa della realizzazione e della gestione di piantagioni di specie arboree finalizzate alla produzione di determinati assortimenti legnosi. È possibile fare una distinzione tra arboricoltura di qualità e di quantità. Nel primo caso si persegue la finalità di produrre assortimenti legnosi di elevato valore tecnologico. Essa è praticabile solo in condizioni ambientali ottimali per le specie arboree impiegate. Nel secondo caso i moduli colturali sono di tipo estensivo e gli assortimenti legnosi, prodotti nella massima quantità possibile, sono destinati alla fabbricazione di pannelli, carta, cartone, imballaggi e infissi.

ARD: Acronimo derivante dalle iniziali delle attività obbligatorie di afforestazione, riforestazione, deforestazione previste dall'articolo 3.3 del Protocollo di Kyoto.

Canopy: Copertura di chioma. In ecologia la canopy rappresenta la porzione della superficie di una comunità o di una coltura costituita dalla chioma delle piante.

CARBO AGE: Progetto di ricerca transnazionale che si è posto l'obiettivo di effettuare l'analisi del ruolo degli ecosistemi forestali europei come serbatoi e fonti di Carbonio durante il loro ciclo di vita. I risultati del progetto rappresentano uno strumento di conoscenza delle dinamiche dei budget di C qualora intervengano fattori perturbanti.

CDM: Clean Development Mechanism. Il meccanismo di sviluppo previsto dall'art 12 del Protocollo di Kyoto che permette alle imprese dei paesi industrializzati con vincoli di emissione di realizzare progetti che mirano alla riduzione delle emissioni di gas serra nei paesi in via di sviluppo senza vincoli di emissione. La finalità del meccanismo è duplice: da una parte permette ai paesi in via di sviluppo di disporre di tecnologie più pulite secondo i paradigmi dello sviluppo sostenibile; dall'altra permette l'abbattimento delle emissioni lì dove è economicamente più conveniente e quindi la riduzione del costo complessivo d'adempimento degli obblighi derivanti dal Protocollo di Kyoto.

CFC: Clorofluorocarburi. Famiglia di composti chimici altamente inquinanti responsabili dell'assottigliamento dello strato di ozono.

CH₄: Metano. Idrocarburo semplice presente in natura sotto forma di gas. Il metano è un gas serra presente in atmosfera in concentrazioni molto inferiori a quelle della CO₂ ma con un potenziale di riscaldamento globale ben 23 volte superiore.

Ciclo biogeochimico: scambio e ciclizzazione di elementi sostanze chimici all'interno degli ecosistemi (aria, acqua, suolo, organismi viventi, lettiera), con dominio spazio-temporale meno ampio, ma più variabile soprattutto nella dimensione temporale (decine di metri K e poche ore/migliaia di anni Ca). La maggior parte dei nutrienti coinvolti nel ciclo, specialmente negli ecosistemi forestali, tende a rimanere all'interno dell'ecosistema. Essi sono trattenuti e accumulati efficientemente e solo modeste perdite alimentano il ciclo geochimico.

Ciclo geochimico: scambio e ciclizzazione di elementi e sostanze chimiche tra ecosistemi (aria, acqua, terra), con domini spazio-temporali ampi (centinaia/migliaia di metri e milioni di anni)

CIPE: Comitato Interministeriale per la Programmazione Economica. Organo politico collegiale del Governo in ambito economico e finanziario che svolge funzioni di coordinamento in materia di programmazione della politica economica da perseguire a livello nazionale, comunitario ed internazionale. Esamina la situazione socio-economica generale ai fini dell'adozione di provvedimenti congiunturali; individua gli indirizzi e le azioni necessarie per il conseguimento degli obiettivi di politica economica; alloca le risorse finanziarie a programmi e progetti di sviluppo; approva le principali iniziative di investimento pubblico del Paese.

CITES: Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Fauna and Flora è un accordo internazionale tra governi che ha lo scopo di assicurare che il commercio internazionale di esemplari di animali e piante selvatici non metta a rischio la sopravvivenza delle relative specie. <http://www.cites.org>

CO₂: Biossido di Carbonio. Seppur presente in basse concentrazioni (circa 0,038% in volume, ovvero ≈ 381 ppm) il biossido di Carbonio è un componente fondamentale dell'atmosfera terrestre perché - insieme al vapore acqueo ed al metano - intrappola la radiazione infrarossa della luce solare riflettendola nuovamente verso la superficie terrestre impedendo alla Terra di raffreddarsi (effetto serra).

Composizione dendrologica: Descrizione dei caratteri di un popolamento forestale basato sull'elenco delle specie dominanti o ritenute più significative.

CONECOFOR: Controllo degli Ecosistemi Forestali. Rete Nazionale istituita dal Corpo forestale al fine di monitorare le interazioni ecologiche tra le componenti strutturali e funzionali degli ecosistemi forestali e i fattori di pressione e cambiamento su larga scala. E' basato su aree permanenti sparse sul territorio nazionale nelle diverse tipologie di ecosistemi forestali.

Convenzione di Bonn: Convention on the Conservation of Migratory Species of Wild Animals (CMS) è un trattato intergovernativo (ratificato da 110 paesi, tra cui Italia) concluso sotto l'egida dell'UNEP, che ha lo scopo di salvaguardare le specie selvatiche ed i loro habitat alla scala globale Bonn 3 giugno 1979) <http://www.cms.int>

COP12: Acronimo della 12° sessione della Conferenza delle Parti della convenzione quadro sui cambiamenti climatici tenutasi a Nairobi nel 2006.

Coppice: Nome inglese del ceduo. Il ceduo è una forma di governo del bosco che si basa sulla capacità di alcune piante di emettere ricacci se tagliate. Questo tipo di formazione boschiva è quindi costituita essenzialmente da polloni, cioè da alberi provenienti da rinnovazione agamica (moltiplicazione vegetativa). Con il taglio il popolamento non viene sostituito nella sua totalità ma solo nella parte epigea.

Età di Culinazione: Corrisponde all'epoca in cui un popolamento coetaneo raggiunge un valore di incremento massimo che è riferibile a diversi parametri quali altezza, diametro, massa, valore, ecc.

Datalogger: Strumento elettronico utilizzato per la registrazione e l'archiviazione di dati nel tempo o in relazione alla posizione geografica.

Densità basale: La densità basale, indicata con Db, esprime il valore di massa volumica che si ottiene calcolando il rapporto tra la massa allo stato anidro ed il volume allo stato fresco di un dato pezzo di legno.

Diffusività: Parametro definito come rapporto fra il coefficiente di conducibilità termica e il prodotto di densità e calore specifico (capacità termica) del corpo oggetto di studio. Rappresenta la riluttanza di una sostanza a trasmettere il calore ed è misurata in $[m^2/s]$ e da informazioni su quanto rapidamente il calore si diffonde all'interno del corpo. La diffusività termica è responsabile insieme ad altre proprietà dell'andamento della temperatura in un punto all'interno di un materiale in caso di cambiamenti della temperatura sulla superficie. Maggiore è la diffusività termica, più rapida è la variazione della temperatura interna di un materiale per variazioni della temperatura superficiale.

Ecosistemi forestali: secondo la definizione FAO (riportata in Piuksi, 1994) si intendono le vegetazioni spontanee in qualsiasi stadio evolutivo, di qualsiasi fisionomia, compresi i canneti, in grado di influenzare il suolo e il regime delle acque, e le comunità animali ad esse associate.

El Niño: Fenomeno di fluttuazione che interessa la coppia oceano-atmosfera.

Emission Trading: La direttiva 2003/87/CE sull'Emission Trading istituisce un sistema di scambio di quote di emissioni di gas effetto serra all'interno dell'Unione Europea che prevede la fissazione di un limite massimo (*cap*) alle emissioni realizzate dagli impianti industriali che ricadono nel campo di applicazione dalla Direttiva, attraverso un Piano Nazionale di Allocazione (PNA) nel quale viene assegnato un certo numero di quote di emissioni a ciascun impianto che rientri nelle categorie previste dalla direttiva. Ciascuna quota (European Unit Allowance) attribuisce il diritto ad emettere una tonnellata di biossido di carbonio equivalente in atmosfera nel corso dell'anno di riferimento o successivo.

Esternalità: Effetto residuo dell'attività economica, in cui i costi e i benefici sono trasferiti a terze parti che non sono i contraenti originali: produttori, consumatori, agenti. Si manifesta quando l'attività di produzione o di consumo di un soggetto influenza, negativamente o positivamente, il benessere di un altro soggetto, senza che quest'ultimo riceva una compensazione (nel caso di impatto negativo) o paghi un prezzo (nel caso di impatto positivo) pari al costo o al beneficio sopportato/ricevuto. (i.e. l'inquinamento dell'aria dovuto a una centrale termoelettrica a carbone).

FACE: Free Air Carbon Enrichment. Metodologia sperimentale che consiste nell'aumentare artificialmente la concentrazione di CO₂ dell'aria attorno e al di sopra di una piantagione forestale. Il sistema si pone la finalità di indagare gli effetti delle elevate concentrazioni di biossido di carbonio sull'ecosistema.

FAO: Food and Agriculture Organization of the United Nations. Agenzia specializzata delle Nazioni Unite con il mandato di aiutare ad accrescere i livelli di nutrizione, aumentare la produttività agricola, migliorare la vita delle popolazioni rurali e contribuire alla crescita economica mondiale. La FAO lavora al servizio dei suoi paesi membri per ridurre la fame cronica e sviluppare in tutto il mondo i settori dell'alimentazione e dell'agricoltura.

Feedback: Processo di retroazione. È tipico degli organismi viventi e dei sistemi biologici che, essendo omeostatici, tendono a perseguire il proprio stato di equilibrio e a mantenerlo stabile attraverso meccanismi di autoregolazione.

Flusso floematico: Il floema è il tessuto in grado di traslocare i prodotti della fotosintesi da foglie adulte ad aree di accrescimento ed accumulo.

Foresta pluviale tropicale: detta impropriamente anche foresta equatoriale perché la localizzazione geografica di questo bioma coincide con la fascia equatoriale di tutti i continenti (Asia Australia, Africa, America meridionale e centrale). Rappresentano la più grande riserva di biodiversità del pianeta terra in quanto ospitano circa la metà delle specie (vegetali e animali) terrestri viventi e sono considerate una fonte inesauribile di principi attivi utili in farmacopea [

Fotosintesi: Sistema di reazioni chimiche per mezzo del quale le piante verdi, in presenza di radiazione solare, producono sostanze organiche a partire da CO₂ ed acqua.

Footprint: Impronta. Nel testo è inteso il Carbon Footprint che rappresenta il 50% circa dell'impronta ecologica. Footprint é utilizzato come abbreviazione per la quantità di carbonio emesso da una particolare attività o organizzazione. Il Carbon Footprint traduce la quantità di anidride carbonica nella quantità di area forestale necessaria ad assorbire le emissioni di anidride carbonica.

FSC: Forest stewardship Council. Organizzazione non governativa internazionale che ha sviluppato un sistema di certificazione forestale indipendente operativo a livello mondiale. Lo scopo dell'FSC è la definizione dei principi che consentano di avviare una gestione delle foreste e delle piantagioni che sia compatibile con l'ambiente, utile dal punto di vista sociale nel rispetto dei diritti dei lavoratori e delle popolazioni locali ed economicamente sostenibile. A tal fine viene definito un insieme di Principi e Criteri (standard) di buona gestione forestale stabiliti tramite la partecipazione e il consenso delle parti interessate.

Gapfillare: Parola proveniente dall'inglese Gap filling. Rappresenta la possibilità di derivare dati sulla base di altre variabili ad essi correlate.

Gas serra: Gas di origine naturale o antropica presenti in atmosfera in grado di assorbire o emettere nello spettro della radiazione infrarossa. Tale proprietà è la causa principale del fenomeno di riscaldamento dell'atmosfera noto come effetto serra.

GFS: Gestione forestale sostenibile. Gestione delle foreste e uso delle risorse e dei territori forestali in modo e misura tali da mantenere la loro biodiversità, produttività, capacità rigenerativa, vitalità e il loro potenziale per garantire ora e in futuro importanti funzioni ecologiche, economiche e sociali a livello locale, nazionale e globale e che non determini danni ad altri ecosistemi.

Global Change: Cambiamento climatico globale. È un fenomeno riconducibile al riscaldamento globale caratterizzato dalla accelerazione dei cambiamenti climatici in tutto il mondo provocati dall'insieme delle attività umane.

GPP: Produzione primaria lorda (Gross primary productivity). Rappresenta il quantitativo totale di materia organica prodotta mediante la fotosintesi, ovvero la fissazione totale di energia effettuata dai vegetali nell'unità di tempo. Parte di questa energia viene usata dai vegetali per il proprio metabolismo e persa attraverso la respirazione.

GtC: GigaTonnellate (o miliardi di tonnellate) di Carbonio. Sistema di misura dell'anidride carbonica emessa nell'atmosfera.

Idrocarburi volatili: Composti organici (COV o VOC dall'inglese Volatile Organic Compounds) di diverso genere che abbiano a 293,15 K (20 °C) una pressione di vapore di 0,01 kPa o superiore (definizione dell'art 268 del D.Lgs. 152/2006 e smi). I VOC possono dividersi in due categorie: composti antropogenici e biogenici. I VOC giocano un ruolo chiave nella chimica della troposfera ed hanno un importante impatto sui cambiamenti climatici.

IFN: Inventario Forestale Nazionale. Rappresenta il primo inventario italiano realizzato nel 1985 dal Ministero dell'Agricoltura e delle Foreste su tutto il territorio nazionale.

Incremento: Aumento della dimensione o del valore di un popolamento forestale nell'unità di tempo. Si distingue in incremento corrente (o annuo) e in incremento medio (parametro del popolamento diviso per l'età dello stesso).

IPCC: Sigla dell'Intergovernmental Panel on Climate Change. Organismo intergovernativo scientifico istituito dalla World Meteorological Organization (WMO) e dal programma ambientale delle Nazioni Unite (UNEP) al fine di fornire ai paesi membri un quadro informativo scientifico ed obiettivo sui cambiamenti climatici.

Lettiera: Strato più superficiale di un suolo forestale composto da residui vegetali in stato di alterazione incipiente. Costituisce elemento essenziale per la conservazione dell'umidità e della fertilità del suolo.

N₂O: Ossido di diazoto. In seguito ai processi di industrializzazione la sua concentrazione in atmosfera è salita a 321.5 ppb. È un composto particolarmente attivo per l'effetto serra (ogni tonnellata di N₂O ha lo stesso potenziale di riscaldamento di 298 tonnellate di CO₂).

NEE: Scambio ecosistemico netto (Net Ecosystem Exchange). NEE viene calcolato come differenza tra il carbonio assorbito in seguito al processo di fotosintesi (GPP) e quello emesso in seguito ai processi di respirazione autotrofa ed eterotrofa. Per convenzione valori negativi di NEE rappresentano un sequestro netto di anidride carbonica da parte di un ecosistema, mentre valori positivi indicano un'emissione netta di CO₂ in atmosfera.

NPP: Produttività primaria netta (Net primary productivity). Frazione della quantità di energia totale (indicata come Produttività primaria lorda) fissata dai produttori primari in un dato ecosistema. Rappresenta il bilancio tra la quota di energia immagazzinata dagli organismi mediante la fotosintesi e quella consumata per il loro mantenimento (respirazione). È definita come il tasso con cui viene prodotta nuova biomassa all'interno dell'ecosistema.

O₃: Ozono. Gas serra che si concentra nell'ozonofera (parte più bassa della stratosfera). In questa zona le radiazioni UV solari vengono filtrate dalle molecole di ozono, causando un innalzamento della temperatura ed evitando quindi un mescolamento verticale con la troposfera, stabilizzandola.

OSB: Acronimo di Oriented Strand Board. Pannelli di legno a struttura simmetrica composto da trucioli piatti o scaglie di legno (strand). Gli strand vengono pressati in 3-4 strati: quelli degli strati esterni sono in generale orientati longitudinalmente rispetto alla lunghezza del pannello, mentre gli strand degli strati intermedi sono ripartiti di solito trasversalmente e presentano un orientamento casuale.

PEFC: Pan European Forest Certification. Sistema di certificazione per la gestione forestale sostenibile con principi e criteri analoghi a quelli dell'FSC.

PPM: Parti per milione. Unità di misura che deriva da un rapporto di unità di misura e viene utilizzato quando il risultato del rapporto cade nell'ordine di grandezza del milionesimo (10⁻⁶). È una notazione tecnica che indica i rapporti tra quantità misurate omogenee, ma che non risulta essere scientificamente valida.

Priming (effetto): Accelerazione della decomposizione del C del suolo in relazione all'apporto di C fresco.

Protocollo di Kyoto: Trattato internazionale in materia ambientale diviso in 28 articoli che disciplinano la riduzione delle emissioni di elementi inquinanti e gas serra. L'obiettivo principale è la riduzione media del 5,2% dei livelli di emissione del 1990, considerato come anno base, nel periodo tra il 2008 ed il 2012. Per i paesi più industrializzati e sviluppati, fra cui l'Unione Europea, è prevista una riduzione maggiore pari all'8%. Per altri paesi, considerati in via di sviluppo, sono fissati limiti meno rigidi. In particolare la riduzione riguarda 6 gas serra: Biossido di carbonio (CO₂); metano (CH₄); protossido di azoto (N₂O); idrofluorocarburi (HFC); perfluorocarburi (PFC); esafluoro di zolfo (SF₆). Per il periodo anteriore al 2008, gli Stati contraenti si impegnano ad ottenere entro il 2005 concreti progressi nell'adempimento degli impegni assunti e a fornirne le prove. Gli Stati contraenti possono utilizzare il 1995 come anno di riferimento per le emissioni di HFC, PFC e SF₆. Il Protocollo propone anche alcuni strumenti che indicano come tradurre in pratica gli obiettivi ed in particolare: 1) L'istituzione di politiche nazionali di riduzione delle emissioni; 2) Il miglioramento dell'efficienza energetica; 3) La promozione di forme di agricoltura sostenibili; 4) Lo sviluppo e promozione di fonti energetiche rinnovabili; 5) La cooperazione sotto forma di scambi d'informazioni ed esperienze.

Rewetting: Parola inglese che significa ri-bagnatura.

Riscaldamento globale: Espressione usata per indicare le fasi di un fenomeno fisico che porta ad un progressivo aumento della temperatura media dell'atmosfera e degli oceani dovuto a cause naturali (cicli solari, moti della Terra, variazioni atmosferiche, ecc.) e all'attività umana (uso di combustibili fossili, deforestazione, allevamento e agricoltura, ecc.).

Serie dendrologica o dendrocronologia: Le tecniche dendrocronologiche consentono di studiare gli ecosistemi forestali sotto diversi aspetti (andamenti climatici, fenomeni di inquinamento, condizioni ambientali, meccanismi fisiologici interni). Dette tecniche si basano sull'analisi delle sequenze cronologiche degli accrescimenti anulari delle piante, ovvero l'insieme ordinato di anelli a partire dal centro dell'albero verso la corteccia (serie anulari).

Short Rotation Forestry: Piantazione per la produzione di biomassa da specie forestali a rapido accrescimento (prevalentemente pioppi, salici, robinia, ontano, eucalipto, ecc.). Le piante, allevate con sesti d'impianto ad elevata densità, e, con turni molto brevi (tra 2 e 5 anni), vengono gestiti con idonee tecniche colturali e ceduti 5 o 6 volte nel corso del ciclo di coltura.

SOM: Sostanza organica del suolo (soil organic matter). Miscela di composti derivanti dal processo biologico a più stadi di degradazione dei residui vegetali ed animali.

Struttura del soprassuolo: Distribuzione nello spazio dagli alberi appartenenti a diverse specie, età e stadi di sviluppo. La struttura verticale indica la distribuzione degli alberi fra gli strati di copertura presenti in bosco. La struttura orizzontale verifica il grado e il modo di mescolanze di specie a parità di strato di copertura.

Tagliata a raso: Superficie forestale interessata da un taglio che consiste nell'asportazione di tutte le piante arboree.

Tavola alsometrica: Elaborato che esprime con tabelle, diagrammi e formule il modello di sviluppo dei popolamenti coetanei puri di una determinata specie.

Torbiera: la torba deriva dall'accumulo di sostanza vegetale parzialmente decomposta. Essa si forma nelle zone umide, nelle torbiere e nelle foreste inondate. Si stima che vi siano circa quattro milioni di miliardi di metri cubi di torba sul pianeta terra, su una superficie pari a circa il 2% di quella totale (circa tre milioni di chilometri quadrati), contenente, immagazzinata, circa 8 miliardi di terajoul di energia.

