

ANNA BARBATI (\*) - BARBARA FERRARI (\*) (°) - ALESSANDRO ALIVERNINI (\*)  
ALESSANDRO QUATRINI (\*) - PAOLO MERLINI (\*\*) - NICOLA PULETTI (\*\*) (\*)  
PIERMARIA CORONA (\*\*)

## SISTEMI FORESTALI E SEQUESTRO DEL CARBONIO IN ITALIA

(\*) Dipartimento per l'Innovazione nei sistemi Biologici, Agroalimentari e Forestali, Università della Tuscia, Viterbo.

(\*\*) Consiglio per la ricerca e la sperimentazione in agricoltura, Forestry Research Centre (CRA-SEL), viale Santa Margherita 80, I-52100 Arezzo.

(°) Autore corrispondente; barbara.ferrari@unitus.it

*La capacità di assorbimento e stoccaggio del carbonio nella biomassa e nei suoli forestali è significativa e può essere influenzata in modo sostanziale dalle pratiche di gestione forestale, oltre che dai disturbi biotici e abiotici. Questo lavoro, partendo da un inquadramento dei processi di mobilizzazione del carbonio nei serbatoi forestali e relativi comparti (biomassa epigea, biomassa ipogea, necromassa legnosa, lettiera e suolo), esamina, su basi quantitative, il ruolo che i boschi ordinariamente gestiti, le piantagioni forestali e gli alberi fuori foresta possono svolgere nelle strategie di mitigazione dei cambiamenti ambientali e adattamento ai loro effetti. Le prospettive operative di gestione forestale possono essere inquadrate in termini di protezione dai disturbi, rinaturalizzazione, realizzazione di piantagioni da legno e incremento degli alberi fuori foresta.*

*Parole chiave:* serbatoi di carbonio; gestione forestale.

*Key words:* carbon sinks; forest management.

*Citazione* - BARBATI A., FERRARI B., ALIVERNINI A., QUATRINI A., MERLINI P., PULETTI N., CORONA P., 2014 – *Sistemi forestali e sequestro del carbonio in Italia*. L'Italia Forestale e Montana, 69 (4): 205-212. <http://dx.doi.org/10.4129/ifm.2014.4.01>

### 1. INTRODUZIONE

Le foreste sono sistemi complessi con capacità adattative in continuo cambiamento, rinnovamento e auto-organizzazione; sono inoltre in costante relazione con i sistemi socio-economici, a loro volta caratterizzati da elevata complessità (PARROT e LANGE, 2013). La capacità delle foreste di contrastare i processi di cambiamento globale, attraverso la riduzione delle emissioni nette di gas serra, riveste un ruolo centrale nei negoziati internazionali sul clima: gli ecosistemi forestali sono infatti in grado di assorbire il carbonio atmosferico e accumularlo, anche per periodi di tempo relativamente lunghi, nella biomassa, nella necromassa e nel suolo (LINDNER *et al.*, 2010; PAN *et al.*, 2011; KOLSTRÖM *et al.*, 2011); al contempo, i prodot-

ti legnosi ritraibili con le utilizzazioni forestali possono conservare considerevoli quantità di carbonio per la durata del loro ciclo di vita (KOSIR, 1999; HILLIER e MURPHY, 2000).

La capacità di assorbimento e stoccaggio del carbonio da parte delle cenosi boschive è largamente influenzata dalle pratiche di gestione forestale. Le strategie e gli interventi in grado di favorire dinamiche di accumulazione di carbonio nei sistemi forestali coinvolgono molteplici aspetti (CORONA e BARBATI, 2010): preservazione della quantità di carbonio stoccata (*stock*), riducendo le perdite dovute a disturbi naturali o antropogenici (a esempio, incendi); aumento dello *stock* di carbonio, attraverso l'implementazione di interventi gestionali o la realizzazione di piantagioni forestali, che favoriscono la permanenza e l'accumulo del carbo-

nio nelle piante e nel suolo; utilizzo sostenibile della biomassa legnosa come fonte energetica al fine di ridurre le emissioni di anidride carbonica (CO<sub>2</sub>) da combustibili fossili.

Tenuto conto di questo composito scenario, il presente contributo, partendo da un inquadramento dei processi di mobilizzazione del carbonio negli ecosistemi forestali (§ 2), intende proporre una riflessione orientata a considerare, su basi quantitative, il ruolo che i boschi italiani possono svolgere nell'assorbimento del carbonio atmosferico (§ 3), con particolare riferimento ai boschi ordinariamente gestiti e ai boschi di neoformazione (§ 4.1), alle piantagioni forestali (§ 4.2) e agli alberi fuori foresta (§ 4.3).

## 2. DINAMICA DEL CARBONIO NEI SISTEMI FORESTALI

Ai fini della contabilizzazione del bilancio tra carbonio immesso nell'atmosfera e carbonio assorbito, le *Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry* (IPCC, 2003) identificano, nell'ambito degli ecosistemi forestali, cinque comparti (*carbon pools*): biomassa aerea (o epigea), biomassa ipogea, necromassa legnosa, lettiera, suolo.

Nel suolo sono stoccate le maggiori riserve di carbonio: circa due terzi del carbonio organico degli ecosistemi terrestri, ovvero il doppio di quello contenuto in atmosfera e il triplo di quello presente complessivamente nella biosfera epigea (SCHLESINGER, 1995). La maggiore quantità di carbonio nel suolo è contenuta nelle sostanze colloidali dell'humus che permangono nel suolo per migliaia di anni. Anche la necromassa può essere considerata un comparto a lento *turnover* in relazione al tempo di residenza, cioè il tempo che il carbonio assorbito tramite processi fotosintetici impiega per essere riemesso mediante processi respirativi; questa dinamica è influenzata da vari fattori quali la comunità di decompositori, le condizioni stagionali, le dimensioni del legno morto e, soprattutto, le modalità di gestione forestale.

Il bilancio del carbonio nei sistemi forestali è ottenuto dalla differenza tra la produttività

primaria lorda, che rappresenta la quantità di carbonio assimilata attraverso i processi fotosintetici, e la quantità di carbonio rilasciato in atmosfera attraverso i processi di respirazione a livello ecosistemico in un dato intervallo di tempo: questa differenza è detta produttività primaria netta dell'ecosistema (NEP - *net ecosystem productivity*) e, se positiva, corrisponde all'incremento di biomassa nei vari *pools*. In generale, ecosistemi forestali non eccessivamente disturbati hanno NEP > 0 e mostrano quindi un incremento di biomassa, e dunque possono essere considerati serbatoi (*sinks*) di carbonio (HYVÖNEN *et al.*, 2007; MAGNANI *et al.*, 2007): in Europa, nel periodo 2005-2010 l'incremento annuo dello *stock* di carbonio nella biomassa legnosa è stimato pari a 0,53%, e sale al 1,42% se si esclude la Federazione Russa ove sono più ingenti i prelievi legnosi (FOREST EUROPE, UNECE e FAO, 2011).

## 3. SERBATOI FORESTALI DI CARBONIO IN ITALIA

Il Registro nazionale dei serbatoi di carbonio agro-forestali è lo strumento deputato alla contabilità dell'assorbimento del carbonio generato dalle attività definite nel Protocollo di Kyoto (PERUGINI, 2010). Nello specifico, il Registro ha il compito di: (i) quantificare, in conformità con le decisioni adottate nell'ambito della convenzione delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici (UNFCCC) e in accordo con le linee guida e buone pratiche fornite dal *panel* intergovernativo sui cambiamenti climatici (IPCC, 2003), l'assorbimento di carbonio a livello nazionale, in conseguenza dell'uso del suolo, cambiamenti di uso del suolo e attività forestali; (ii) certificare l'assorbimento di carbonio ai fini della riduzione del bilancio netto nazionale delle emissioni di gas a effetto serra.

Il sistema di contabilità del Registro si fonda su quattro strumenti tecnici predisposti a scala nazionale e tra loro coordinati: (i) inventario dell'uso delle terre d'Italia (IUTI), quadro conoscitivo dettagliato e diacronico delle categorie di uso del suolo (Foresta, Agricolo, Prati e Pascoli, Terre umide e corpi idrici, Urbano e altre terre) previste da UNFCCC nell'ambito

di sequenze temporali prestabilite (1990, 2008 e 2012); (ii) inventario degli stock di carbonio (ISCI), ai fini della quantificazione degli stock di carbonio e della loro dinamica nelle aree identificate da IUTI; ISCI è aggiornato mediante i dati forniti dall'Inventario Nazionale delle Foreste e dei Serbatoi di Carbonio (INFC), realizzato dal Corpo Forestale dello Stato quale strumento permanente di monitoraggio dei boschi italiani; (iii) censimento degli incendi forestali d'Italia (CIFI), per l'identificazione e la quantificazione delle superfici forestali percorse da incendio dal 2008 al 2012; (iv) inventario delle emissioni da incendi forestali, ai fini della valutazione delle emissioni degli altri gas ad effetto serra ( $\text{CH}_4$  e  $\text{N}_2\text{O}$ ) delle superfici forestali bruciate riportate da CIFI.

MARCHETTI *et al.* (2012) e CORONA *et al.* (2012) riportano le stime di superficie per gli anni 1990 e 2008, relativamente alle categorie di uso del suolo, suddivise in ulteriori sottocategorie, definite da IUTI a livello regionale e nazionale: in questo intervallo temporale si registra un aumento netto di superficie forestale, e dunque di potenziali serbatoi di carbonio, pari al 5,6% rispetto al 1990, con un tasso composto di incremento annuo pari a 0,3% e un aumento netto annuo di superficie boscata rispetto alla superficie territoriale nazionale pari a circa 0,1%. Sulla base dei dati INFC, il carbonio stoccato nella parte arborea epigea delle aree boscate era pari, nel 2005, a circa 437 milioni di tonnellate, con un'incertezza campionaria di  $\pm 1\%$  (TABACCHI *et al.*, 2010a).

La contabilizzazione degli assorbimenti di  $\text{CO}_2$  con metodi inventariali si basa principalmente sulla stima delle variazioni degli *stocks* di carbonio nei cinque comparti definiti per gli ecosistemi forestali (v. § 2). Nel nostro Paese, la stima delle variazioni di stock di carbonio sarà basata su due inventari successivi (*stock change method*; IPCC, 2003): in particolare, quello già realizzato (INFC 2005) e quello attualmente in corso di realizzazione consentiranno di quantificare le variazioni annuali tra il 2008 e il 2012, interpolando i dati acquisiti dalle due rilevazioni inventariali.

Una quantificazione preliminare dell'entità di *sink* svolto dalla componente arborea viva epi-

gea delle cenosi forestali italiane è stata peraltro condotta da TABACCHI *et al.* (2010b), facendo riferimento ai dati INFC del 2005, sulla base del metodo denominato *default method* o *gain and loss method* (IPCC, 2003), che prevede il calcolo della variazione annua dello *stock* di carbonio mediante la somma algebrica delle variazioni positive dello *stock* dovute ai fenomeni di accrescimento e delle variazioni negative legate alle perdite di biomassa viva. In termini di volume cormometrico, l'incremento netto annuo, ottenuto dalla differenza tra incremento lordo e le perdite per cause naturali, risulta pari a 35,0  $\text{Mm}^3$ , con una incertezza (al livello probabilistico del 95%) di circa  $\pm 1,8 \text{Mm}^3$ . La variazione netta, ottenuta sottraendo all'incremento netto le utilizzazioni e la massa arborea epigea di aree forestali che hanno cambiato destinazione di uso, risulta pari a +20,9  $\text{Mm}^3$ , con una incertezza di circa  $\pm 4,0 \text{Mm}^3$ . In termini di biomassa, la variazione netta annua risulta pari a +14,7 Mt, con una incertezza di  $\pm 2,8 \text{Mt}$ , corrispondenti a circa 7,4 Mt di carbonio assorbito annualmente nella massa arborea epigea delle cenosi forestali italiane.

#### 4. LINEE GESTIONALI

##### 4.1. Boschi

Nel complesso, l'impatto dei cambiamenti climatici sugli ecosistemi forestali italiani si può tradurre in una riduzione della produttività dei boschi, in una modificazione della loro composizione specifica, in una loro maggiore vulnerabilità ai disturbi (siccità, incendi, patogeni) e in una perdita locale di biodiversità (CHIRIACÒ e VALENTINI, 2013).

A fronte di queste alterazioni e alla luce dei risultati riportati nel paragrafo precedente la gestione forestale può incidere in modo significativo sulla capacità del bosco di sottrarre carbonio dall'atmosfera e influenzarne resilienza e resistenza (MAGNANI e MATTEUCCI, 2009). Tenuto conto dello stato diffuso di semplificazione strutturale e compositiva dei boschi del nostro Paese, i serbatoi forestali di carbonio possono essere potenziati applicando orientamenti colturali volti a recuperare o aumen-

tarne l'efficienza bioecologica. In particolare, all'uopo possono essere individuate almeno quattro linee di intervento:

- i. recupero dei soprassuoli degradati, cioè di quei soprassuoli in cui risultano compromesse la funzionalità e la complessità del sistema: l'incremento della quantità di carbonio sequestrabile nel medio periodo con questa tipologia di interventi è stata stimata non inferiore a  $1,3 \text{ Mt anno}^{-1}$  (CORONA *et al.*, 1997);
- ii. aumento delle provvigioni ove opportuno e, in taluni boschi coetanei, anche allungamento del turno, con conseguente maggiore accumulo di sostanza organica nel suolo;
- iii. calibrato aumento dei prelievi, da verificare caso per caso in una logica di pianificazione forestale a livello aziendale e di sostenibilità delle utilizzazioni; di particolare interesse è non tanto l'aumento dei prelievi a fini bioenergetici, quanto soprattutto la valorizzazione delle produzioni legnose in termini di assortimenti con ciclo di vita relativamente lungo (a esempio, fornitura di materiale per la bioedilizia e l'arredamento) (KOSIR, 1999; HILLIER e MURPHY, 2000);
- iv. conversione, in aree economicamente vocate e ove opportuno, dei boschi cedui in fustaia, operazione che, oltre a consentire l'allungamento dei cicli di utilizzazione e quindi l'immobilizzazione del carbonio nella biomassa epigea e ipogea per tempi più lunghi, consente anche di valorizzare potenzialmente le produzioni legnose in termini di assortimenti con ciclo di vita relativamente lungo.

Sotto il profilo operativo, le tecniche selvicolturali applicabili sono molteplici. Posto che qualsiasi intervento selvicolturale rappresenta, almeno temporaneamente, una perdita nel bilancio del carbonio espresso in termini di NEP, è comunque possibile applicare forme di trattamento che riducano da un lato l'impatto sui processi di respirazione e, dall'altro, contribuiscano, nel lungo termine, a un aumento della NEP stessa (CORONA e BARBATI, 2010); esempi in questo senso sono forme di trattamento che: riducono la superficie unitaria delle tagliate a raso; facilitano la conservazione di una copertura continua nel tempo anche se temporane-

amente più rada; agevolano la rinnovazione naturale, favorendo entro certi limiti, specie arboree e genotipi locali potenzialmente più adattabili ai cambiamenti climatici in relazione alla stazione; aumentano il livello di stabilità del bosco, e in particolare la sua resilienza nei confronti di fattori di disturbo abiotici e biotici che possono comportare un aumento dei rilasci di carbonio nell'atmosfera; promuovono modalità di taglio ed esbosco a basso impatto ambientale, tali da favorire la conservazione degli elementi minerali e limitare il compattamento del suolo e l'erosione superficiale. Con particolare riferimento alle fustaie, la gestione selvicolturale può essere opportunamente impostata in una ottica sistemica, assumendo come obiettivo fondamentale la ricerca della efficienza funzionale della cenosi boschiva (CIANCIO e NOCENTINI, 1996; CIANCIO, 1999; NOCENTINI e COLL, 2013). In termini operativi ciò si concretizza nel sostenere la resilienza ecologica del sistema, in modo che esso sia in grado di reagire adeguatamente agli impatti, e nel generare flessibilità sia nelle istituzioni che nelle aspettative dei portatori di interesse, a fronte di condizioni sempre mutevoli (CORONA e SCOTTI, 2011). Analoghe considerazioni possono valere anche per i boschi di neoformazione (oltre 28.000 ha ogni anno, MARCHETTI *et al.*, 2012), la cui gestione va innanzitutto orientata alla loro salvaguardia nei confronti dei fattori di disturbo, tenuto conto della loro prevalente localizzazione di interfaccia con aree a prevalente uso agricolo, pastorale o residenziale.

#### 4.2. *Piantagioni forestali*

INFC (2005) stima che in Italia gli impianti di specie forestali nella categoria "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) (GASPARINI *et al.*, 2009). Secondo IUTI (MARCHETTI *et al.*, 2012), gli impianti di arboricoltura da legno coprirebbero circa 144.000 ha. A differenza del bosco permanente (v. § 4.1) la capacità di assorbimento delle piantagioni da legno è limitata nel tempo, trattandosi di colture a carattere temporaneo;

tuttavia questo tipo di interventi può offrire un sensibile contributo al sequestro del carbonio atmosferico, soprattutto nella fase iniziale di affermazione su terreni ex-agricoli, in termini di accumulo nel suolo. Secondo INFC (2005), l'assorbimento di carbonio negli impianti di arboricoltura da legno può essere stimato mediamente pari a 2,45 tonnellate C ha<sup>-1</sup> anno<sup>-1</sup> per le conifere, 1,81 tonnellate ha<sup>-1</sup> anno<sup>-1</sup> per i pioppeti, 1,84 tonnellate ha<sup>-1</sup> anno<sup>-1</sup> per le altre latifoglie. Per quanto riguarda l'accumulo nel suolo, in aree dell'Italia nord-orientale è stato stimato un aumento di C pari al 23% e al 6% rispettivamente alle profondità di 0-10 cm e 10-30 cm in un terreno rimboschito artificialmente da 20 anni rispetto a un terreno coltivato a mais (DEL GALDO *et al.*, 2003).

Le piantagioni più efficaci in termini di sequestro del carbonio sono quelle a turno medio o lungo, destinate alla produzione di assortimenti con ciclo di vita relativamente lungo. Tra i modelli colturali che maggiormente si avvicinano alle condizioni indicate si possono considerare impianti di latifoglie con legno di pregio con turni medi intorno a 35-40 anni o anche superiori destinati a fornire assortimenti da trancia, ovvero piantagioni di conifere finalizzate ad ottenere, con turni intorno a 50 anni, segati di qualità (MINOTTA *et al.*, 2010).

Le piantagioni specializzate a turno molto breve (*short rotation forestry*) di pioppi, salici, robinia, ontani ed eucalitti sono caratterizzate da elevata densità di impianto (anche 10-15.000 individui a ettaro) e vengono utilizzate ogni 1-6 anni con tecniche molto simili a quelle delle tradizionali colture agrarie (PETTENELLA e GUERCI, 2010); in condizioni idonee questo tipo di coltivazioni può arrivare a fissare anche fino a 5-7 tonnellate di carbonio ha<sup>-1</sup> anno<sup>-1</sup> (ZENONE *et al.*, 2007).

Al fine di una loro effettiva efficacia in termini sia economici che ambientali, le piantagioni da legno devono essere collocate in aree pienamente adatte dal punto di vista pedologico e climatico: la effettiva disponibilità di terreni potenzialmente idonei all'uso in Italia può essere valutata intorno a un milione di ettari. Tuttavia i cambiamenti globali possono condizionare la diffusione di queste piantagioni soprattutto

laddove l'apporto idrico sia limitante, visto che in genere le specie impiegate hanno un alto fabbisogno idrico. D'altro canto, fattori come l'aumento di temperatura e l'aumento della concentrazione di CO<sub>2</sub> nell'atmosfera possono aumentare in maniera significativa la capacità di stoccaggio di carbonio in questo tipo di piantagioni nel prossimo futuro (CALFAPIETRA *et al.*, 2003; LUKAC *et al.*, 2010).

Ai fini della fissazione del carbonio atmosferico, nella progettazione di piantagioni forestali può essere utile prevedere una mescolanza di specie arboree con caratteristiche diverse in termini di fototemperamento e rapidità di accrescimento, in modo da ottenere la massima superficie fotosintetizzante fino dalle prime fasi di impianto (piantagioni policicliche, v. <http://www.inbiowood.eu/>): tra l'altro, questo tipo di piantagioni può assicurare una diversificazione qualitativa della sostanza organica apportata al suolo, è più resistente ai disturbi e, in genere, più interessante da un punto di vista percettivo (PELLERI *et al.*, 2012). A fronte di ciò, la funzione di serbatoio di carbonio dell'impianto può essere ulteriormente incrementata dall'implementazione di pratiche di gestione che agiscono, direttamente o indirettamente, sull'accumulo di biomassa epigea ed ipogea e in grado di favorire un maggior sequestro di carbonio nel suolo forestale (a esempio, riduzione delle lavorazioni al suolo, ritorno al suolo della biomassa derivante da interventi intercalari quali sfolli, pulizie, diradamenti, miglioramento della struttura del terreno, ecc., v. PETTENELLA e GUERCI, 2010).

#### 4.3. Alberi fuori foresta

Il termine "alberi fuori foresta" (AFF) si riferisce a boschetti, formazioni forestali lineari (alberature, frangivento) e alberi sparsi ubicati in aree rurali e urbanizzate. La sperimentazione condotta da CORONA *et al.* (2009) ha fornito un primo orientamento sulla capacità di serbatoio di carbonio degli AFF in Italia, il cui *stock* è stimato pari a circa 121 Mg per km<sup>2</sup> di territorio, pari a circa 30 Mt a livello nazionale, con una quantità di carbonio fissato nella dendromassa epigea pari a oltre 1 Mt anno<sup>-1</sup>: questi valori sono non trascurabili, anche tenuto conto che

la valutazione è stata condotta al netto della quantità di carbonio contenuta nella lettiera e nel suolo.

Il ruolo svolto dagli AFF nel bilancio del carbonio è peraltro oggetto di crescente attenzione soprattutto nei contesti urbanizzati (DOBBS *et al.*, 2011; v. anche <http://www.emonfur.eu/>). In Italia, si stima che i boschi urbani interessino circa 43.000 ha con una dimensione media di 2,2 ha (CORONA *et al.*, 2011). Il ruolo di contenimento della CO<sub>2</sub> da parte dei boschi urbani avviene non solo attraverso l'assorbimento per via fotosintetica e il conseguente stoccaggio di carbonio nei tessuti legnosi, ma anche attraverso la riduzione di emissione di CO<sub>2</sub> derivante dal risparmio energetico: l'effetto di raffreddamento dato da evapotraspirazione e ombreggiamento delle aree verdi riduce i consumi di condizionamento (effetto "isola di calore") durante le stagioni calde, mentre la funzione di coibentazione e di frangivento degli alberi nelle stagioni fredde limita quelli per il riscaldamento (STEENEVELD *et al.*, 2011; ARMSON *et al.*, 2012). Va inoltre sottolineato il significativo contributo che queste formazioni forestali apportano alla riduzione degli inquinanti atmosferici, quali ossidi di varia natura, idrocarburi e polveri sottili nonché di carbonio (TALLIS *et al.*, 2011; BARÒ *et al.*, 2014; MANES *et al.*, 2014).

## 5. CONCLUSIONI

L'attuale contesto di cambiamenti globali comporta rischi e opportunità per le foreste italiane: la loro capacità di mitigazione e adattamento agli effetti di tali cambiamenti è riconosciuta quale strumento strategico utile al fine di affrontarne gli impatti. In particolare, la mitigazione attenua l'ampiezza dei mutamenti mediante la riduzione di squilibri nel bilancio tra emissioni e capacità di assorbimento dei gas serra, mentre l'adattamento ai cambiamenti include gli interventi che permettono di continuare a svolgere le proprie funzioni anche in condizioni climatiche modificate (SCARASCIA MUGNOZZA e MATTEUCCI, 2010): di fatto, le foreste di origine naturale, le piantagioni da legno

e gli alberi fuori foresta possiedono ampie potenzialità a supporto di entrambe le strategie.

Peraltro, tali strategie possono essere realizzate attraverso il coordinamento e la collaborazione tra istituzioni pubbliche, *stakeholders* e iniziative correlate alle politiche forestali con l'obiettivo di raggiungere una convergenza politica e istituzionale di intenti e strumenti finanziari locali, nazionali e cofinanziati dall'Unione Europea. In questo quadro la ricerca scientifica e tecnologica svolge un ruolo chiave di supporto, nel permettere di ottenere informazioni e conoscenze sempre più approfondite e a costi sostenibili, ma decisiva è anche l'assunzione di responsabilità conseguenti al saper considerare l'impatto dell'azione gestionale sulle varie componenti degli ecosistemi forestali.

## SUMMARY

### *Forest ecosystems and carbon sequestration in Italy*

Forest ecosystems contain large stocks of carbon sequestered in biomass and soil, that could either increase or decrease depending on forest management practices and disturbances. This paper, starting from processes of carbon mobilization within different forest carbon pools (aboveground biomass, belowground biomass, dead wood, litter and soil), highlights, on a quantitative basis, to what extent managed forests, forest plantations and trees outside forest can play a role as carbon sinks in Italy. Practical perspectives of forest management are outlined, including prevention of disturbances, renaturalization, land restoration, and establishment of forest tree crops and trees outside forest on farmland.

## BIBLIOGRAFIA

- ARMSON D., STRINGER P., ENNOS A.R., 2012 – *The effect of tree shade and grass on surface and globe temperatures in an urban area*. Urban Forestry and Urban Greening, 11 (3): 245-255. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ufug.2012.05.002>
- BARÓ F., CHAPARRO L., GÓMEZ-BAGGETHUN E., LANGE-MEYER J., NOWAK D. J., TERRADAS J., 2014 – *Contribution of ecosystem services to air quality and climate change mitigation policies: The case of urban forests in Barcelona, Spain*. Ambio, 43 (4): 466-479. <http://dx.doi.org/10.1007/s13280-014-0507-x>
- CALFAPIETRA C., GIELEN, B., GALEMA, A.N.J., LUKAC, M., DE ANGELIS, P., MOSCATELLI, M.C., CEULEMANS, R., SCARASCIA-MUGNOZZA, G., 2003 – *Free-air CO<sub>2</sub> enrichment (FACE) enhances biomass production in a short-rotation poplar plantation (POPFACE)*. Tree Physiology, 23: 805-814. <http://dx.doi.org/10.1093/treephys/23.12.805>
- CHIRIACÒ M.V., VALENTINI R., 2013 – *Le foreste italiane, una ricchezza a rischio*. Ecoscienza, 5: 52-53.

- CIANCIO O., 1999 – *I moduli colturali nella gestione dei boschi*. In: Ciancio O. (a cura di), “Nuove frontiere nella gestione forestale”. Accademia Italiana di Scienze Forestali, Firenze, p. 15-28.
- CIANCIO O., NOCENTINI S., 1996 – *Il bosco e l'uomo: l'evoluzione del pensiero forestale dal umanesimo moderno alla cultura della complessità. La selvicoltura sistemica e la gestione su basi naturali*. In: Ciancio O. (a cura di), “Il bosco e l'uomo”. Accademia Italiana di Scienze Forestali, Firenze, p. 21-116.
- CORONA P., FERRARA A., LA MARCA O., 1997 – *Sustainable management of forests for atmospheric CO<sub>2</sub> depletion: the Italian case*. Journal of Sustainable Forestry, 3/4: 81-91. [http://dx.doi.org/10.1300/J091v05n03\\_05](http://dx.doi.org/10.1300/J091v05n03_05)
- CORONA P., CHIRIACÒ M.V., SALVATI R., MARCHETTI M., LASSERRE B., FERRARI B., 2009 – *Proposta metodologica per l'inventario su vasta scala degli alberi fuori foresta*. L'Italia Forestale e Montana, 64 (6): 367-380. <http://dx.doi.org/10.4129/IFM.2009.6.04>
- CORONA P., BARBATI A., 2010 – *Orizzonti operativi della pianificazione e gestione forestale a supporto delle politiche sui cambiamenti climatici*. In: Sanesi G., Mairota P. (a cura di), “Foreste e ciclo del carbonio in Italia: come mitigare il cambiamento climatico”. Fondazione Gas Natural, Barcellona, Spagna, p. 147-161.
- CORONA P., SCOTTI R., 2011 – *Systemic silviculture, adaptive management and forest monitoring perspectives*. L'Italia Forestale e Montana, 3: 219-224. <http://dx.doi.org/10.4129/ifm.2011.3.05>
- CORONA P., AGRIMI M., BAFFETTA F., BARBATI A., CHIRIACÒ M.V., FATTORINI L., POMPEI E., MATTIOLI W., 2011 – *Extending large-scale forest inventories to assess urban forests*. Environmental Monitoring and Assessment, 184 (3): 1409-1422. <http://dx.doi.org/10.1007/s10661-011-2050-6>
- CORONA P., BARBATI A., TOMAO A., BERTANI R., VALENTINI R., MARCHETTI M., FATTORINI L., PERUGINI L., 2012 – *Land use inventory as framework for environmental accounting: an application in Italy*. iForest, 5: 204-209.
- 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. <http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-2486.2003.00657.x>
- DOBBS C., ESCOBEDO F., ZIPPERER W., 2011 – *A framework for developing urban forest ecosystem services and goods indicators*. Landscape and Urban Planning, 99: 196-206. <http://dx.doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.11.004>
- FOREST EUROPE, UNECE, FAO, 2011 – *State of Europe's Forests 2011. Status and Trends in Sustainable Forest Management in Europe*.
- GASPARINI P., DE NATALE F., DI COSMO L., GAGLIANO C., SALVADORI G., TABACCHI G., TOSI V. (a cura di), 2009 – *I caratteri quantitativi 2005 - Parte 1, versione 2. Inventario nazionale delle foreste e dei serbatoi forestali di carbonio*. MiPAAF - Ispettorato Generale Corpo Forestale dello Stato, CRA-MPF, Trento, Italy.
- HILLIER B., MURPHY R., 2000 – *Life cycle assessment of forest products - a good story to tell*. Journal of the Institute of Wood Science, 15: 221-232.
- HYVÖNEN R., ÅGREN G.I., LINDER S., PERSSON T., COTRUFO M.F., EKBLAD A., FREEMAN M., GRELE A., JANSSENS I.A., JARVIS P.G., KELLOMÄKI S., LINDROTH A., LOUSTAU D., LUNDMARK T., NORBY R.J., OREN R., PILEGAARD K., RYAN M.G., SIGURDSSON B.D., STRÖMGREN M., VAN OJEN M., WALLIN G., 2007 – *The likely impact of elevated [CO<sub>2</sub>], nitrogen deposition, increased temperature and management on carbon sequestration in temperate and boreal forest ecosystems: a literature review*. New Phytologist, 173: 463-480. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1469-8137.2007.01967.x>
- KOLSTRÖM M., LINDNER M., VILÉN T., MAROSCHEK M., SEIDL R., LEXER M.J., NETHERER S., KREMER A., DELZON S., BARBATI A., MARCHETTI M., CORONA P., 2011 – *Reviewing the science and implementation of climate change adaptation measures in European forestry*. Forests, 2: 961-982. <http://dx.doi.org/10.3390/f2040961>
- KOSIR B., 1999 – *Life cycle assessment of products in forestry*. L'Italia Forestale e Montana, 67 (4): 347-358.
- IPCC, 2003 – *Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry*. IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme. Institute for Global Environmental Strategies.
- LINDNER M., MAROSCHEK M., NETHERER S., KREMER A., BARBATI A., GARCIA-GONZALO J., SEIDL R., DELZON S., CORONA P., KOLSTRÖM M., LEXER M. J., MARCHETTI M., 2010 – *Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems*. Forest Ecology and Management, 259 (4): 698-709. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.023>
- LUKAC M., CALFAPIETRA C., LAGOMARSINO A., LORETO F., 2010 – *Global climate change and tree nutrition: effects of elevated CO<sub>2</sub> and temperature*. Tree Physiology, 30: 1209-1220. <http://dx.doi.org/10.1093/treephys/tpq040>
- 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: 847-850. <http://dx.doi.org/10.1038/nature05847>
- MAGNANI F., MATTEUCCI G., 2009 – *Selvicoltura e cambiamenti climatici*. In: “Atti del Terzo Congresso Nazionale di Selvicoltura”. Taormina (ME). Accademia Italiana di Scienze Forestali, Firenze, p. 532-535.
- MANES F., SILLI V., SALVATORI E., INCERTI G., GALANTE G., FUSARO L., PERRINO C., 2014 – *Urban Ecosystem Services: tree diversity and stability of PM10 removal in the Metropolitan Area of Rome*. Annali di Botanica, 4: 19-26.
- MARCHETTI M., BERTANI R., CORONA P., VALENTINI R., 2012 – *Cambiamenti di copertura forestale e dell'uso del suolo nell'inventario dell'uso delle terre in Italia*. Forest@, 9: 170-184. <http://dx.doi.org/10.3832/efor0696-009>
- MINOTTA G., SANESI G., COLANGELO G., LAFORTEZZA R., 2010 – *Inventario forestale nazionale (INFN) e ruolo delle piantagioni forestali*. In: Sanesi G., Mairota P. (a cura di), “Foreste e ciclo del carbonio in Italia: come mitigare il cambiamento climatico”. Fondazione Gas Natural, Barcellona, Spagna, p. 132-146.
- NOCENTINI S., COLL L., 2013 – *Mediterranean forests:*

- human use and complex adaptive systems*. In: Messier C., Puettmann K.J., Coates K.D. (a cura di), "Managing forests as complex adaptive systems". Routledge, Oxon.
- PAN Y., BIRDSEY R.A., FANG J., HOUGHTON R., KAUPPI P.E., KURZ W.A., PHILLIPS O.L., SHVIDENKO A., LEWIS S.L., CANADELL J.G., CIAIS P., JACKSON R.B., PACALA S., MCGUIRE A.D., PIAO S., RAUTIAINEN A., SITCH S., HAYES D., 2011 – *A large and persistent carbon sink in the world's forests*. Science, 33: 988-993. <http://dx.doi.org/10.1126/science.1201609>
- PARROTT L., LANGE H., 2013 – *An introduction to complexity science*. In: Messier C., Puettmann K.J., Coates K.D. (a cura di), "Managing forests as complex adaptive systems". Routledge, Oxon.
- PELLERI F., RAVAGNI S., BIDINI C., BIANCHETTO E., 2012 – *Impianti policiclici e multifunzionali: primo esempio in Toscana*. Sherwood, foreste e alberi oggi, 187: 11-14.
- PERUGINI L., 2010 – *Il Registro dei serbatoi di carbonio in Italia*. In: Brotto L., Ciccarese L., Giulietti V., Mori P., Pettenella D., Perugini L., Romano R. (a cura di), "Gli accordi volontari per la compensazione della CO<sub>2</sub>. Indagine conoscitiva per il settore forestale in Italia". INEA Quaderno 2, p. 87-92.
- PETTENELLA D., GUERCI L., 2010 – *Gli interventi di gestione forestale che possono mitigare il cambiamento climatico*. In: Sanesi G., Mairota P. (a cura di), "Foreste e ciclo del carbonio in Italia: come mitigare il cambiamento climatico". Fondazione Gas Natural, Barcellona, Spagna, p. 163-182.
- SCARASCIA MUGNOZZA G., MATTEUCCI G., 2010 – *Foreste e mitigazione atmosferica*. In: Sanesi G., Mairota P. (a cura di), "Foreste e ciclo del carbonio in Italia: come mitigare il cambiamento climatico". Fondazione Gas Natural, Barcellona, Spagna, p. 33-46.
- SCHLESINGER W.H., 1995 – *Soil respiration and changes in soil carbon stocks*. In: Woodwell G.M., Mackenzie F.T. (eds.), "Biotic Feedbacks in the Global Climate System". Oxford University Press, Oxford, p. 159-168.
- STEENEVELD G.J., KOOPMANS S., HEUSINKVELD B.G., VAN HOVE L.W.A., HOLTSLAG A.A.M., 2011 – *Quantifying urban heat island effects and human comfort for cities of variable size and urban morphology in the Netherlands*. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 116 <http://dx.doi.org/10.1029/2011JD015988>
- TABACCHI G., BIANCHI M., GASPARINI P., NOTARANGELO G., 2010a – *Inventario forestale nazionale (INFC) e ruolo delle piantagioni forestali*. In: Sanesi G., Mairota P. (a cura di), "Foreste e ciclo del carbonio in Italia: come mitigare il cambiamento climatico". Fondazione Gas Natural, Barcellona, Spagna, p. 103-131.
- TABACCHI G., DE NATALE F., GASPARINI P., 2010b – *Coerenza ed entità delle statistiche forestali. Stime degli assorbimenti netti di carbonio*. Sherwood, 165: 11-19.
- TALLIS M., TAYLOR G., SINNETT D., FREER-SMITH P., 2011 – *Estimating the removal of atmospheric particulate pollution by the urban tree canopy of London, under current and future environments*. Landscape and Urban Planning, 103: 129-138. <http://dx.doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.07.003>
- 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).