

IL BILANCIO DEL CARBONIO IN ECOSISTEMI FORESTALI MEDITERRANEI

(*) Istituto per i Sistemi Agricoli e Forestali del Mediterraneo, CNR-ISAFOM, Rende (Cosenza)

Il lavoro presenta le attività di ricerca in corso per la quantificazione del bilancio di carbonio di ecosistemi forestali italiani tramite la tecnica di misura diretta degli scambi a scala di copertura (*eddy covariance*). La tecnica misura lo scambio netto di ecosistema che quantifica il bilancio annuale tra carbonio assorbito tramite la fotosintesi e rilasciato dai processi respirativi e di decomposizione. In Italia, dove, nel 1993-94 nella faggeta di Collelongo (Aq) è stata installata la prima stazione europea di questo genere, sono attive 15 stazioni su ecosistemi forestali di diversa tipologia: dalla macchia mediterranea, a fustaie di latifoglie e conifere, a boschi cedui e in conversione sino a piantagioni forestali, gran parte delle quali fanno parte della rete del progetto FISR CarboItaly.

Le ricerche hanno consentito di determinare il bilancio di carbonio di diversi ecosistemi forestali italiani, di studiarne la risposta ai parametri climatici e la variabilità interannuale. La prosecuzione di queste ricerche consentirà di ottenere importanti risultati sulla dinamica a medio e lungo termine del bilancio del carbonio di alcune foreste italiane, anche in risposta ai cambiamenti climatici ed alle attività di gestione forestale.

Parole chiave: bilancio del carbonio, scambi a livello di ecosistema, produttività netta di ecosistema, ecosistemi forestali.

Key words: carbon budget, canopy fluxes, net ecosystem productivity, forest ecosystems.

Mots clés: budget du carbone, échanges au niveau d'écosystème, productivité nette d'écosystème, écosystème forestiers.

1. INTRODUZIONE

Il bilancio del carbonio è una relazione del tipo bilancio di massa che tiene conto degli ingressi (input), delle uscite (output) e dell'immagazzinamento (storage) del carbonio nei vari compartimenti di un sistema biologico e del suo ambiente fisico. I confini del sistema possono riferirsi a organismi semplici (singoli alberi), a ecosistemi (popolamenti forestali) arrivando fino a intere regioni e all'intero pianeta (Apps e Price, 1996). Fra tutti questi livelli esistono connessioni ed interrelazioni, sia a livello eco-biologico che di scambi, ed è sempre più sentito il bisogno di effettuare passaggi di scala delle risposte ottenute dai livelli inferiori a quelli superiori (Ehleringer e Field, 1993; Jarvis, 1995).

I ricercatori forestali sono sempre stati interessati alla produzione primaria delle foreste ed alla comprensione dei meccanismi ecofisiologici del suo controllo. L'interesse scientifico per una quantificazione più dettagliata del contributo degli ecosistemi vegetali al bilancio del carbonio globale, ha avuto un particolare impulso negli anni '70, quando, nell'ambito del Programma Biologico Internazionale (IBP), furono iniziati gli studi per la stima della produttività primaria della biosfera (Lieth e Whittaker, 1975). Da allora, tramite perfezionamenti successivi si è determinato che le foreste, pur ricoprendo poco più del 30% della superficie delle terre emerse, contengono oltre l'80% del carbonio epigeo e circa il 40% di quello presente nel suolo e sono sede di circa il 50% della produttività delle terre emerse (Melillo *et al.*, 1993; De Angelis e Scarascia Mugnozza, 1995).

Va sottolineato che la determinazione del contributo degli ecosistemi forestali al ciclo globale del carbonio deve confrontarsi con le difficoltà legate ad una stima di tutte le sue componenti, sia epigee (fusto, rami, foglie) che a livello del suolo (lettiera, humus, radici) (Cannell, 1982). Per questi motivi, la disponibilità di dati sperimentali non è ampia (Lieth e Whittaker, 1975; Reichle, 1981); inoltre, le

stime di produttività primaria netta (NPP) possono essere affette da incertezze ed errori, spesso sono limitate alla sola produttività epigea e varie possono essere le metodologie utilizzate (Cannell, 1982; Lyssaert *et al.*, 2007).

Da circa 15-20 anni, lo sviluppo della tecnica di misura degli scambi di massa ed energia tra ecosistemi vegetali ed atmosfera (*eddy covariance*) consente di effettuare misure al di sopra di ecosistemi vegetali. La tecnica di misura è caratterizzata da un'ampia integrazione spaziale (alcuni ettari in ambito forestale) e temporale, dato che può operare a scala oraria, giornaliera, stagionale, annuale e pluriannuale e consente di studiare il ruolo del clima e di altre determinanti ecologiche e di gestione forestale nella determinazione del bilancio del carbonio di ecosistemi forestali (Baldocchi, 2003).

La regione mediterranea rappresenta una delle aree critiche del globo negli scenari dei futuri cambiamenti globali, eppure i dati provenienti da ecosistemi situati in questa regione, risultano relativamente limitati sia dal punto di vista degli studi classici (Visonà *et al.*, 1975; Leonardi e Rapp, 1980; Calamini *et al.*, 1983; Scarascia Mugnozza *et al.*, 2000) che da quello degli studi più avanzati, con tecniche integrate (Valentini *et al.*, 1996, Valentini, 2003; Ciais *et al.*, 2005; Marino *et al.*, 2005). In questa ottica acquista rilevanza lo studio quantitativo dei processi funzionali degli ecosistemi forestali più importanti ed estesi di questa regione.

2. CENNI METODOLOGICI

L'obiettivo di questo lavoro non è quello di descrivere in dettaglio la tecnica di misura degli scambi a livello di copertura forestale *eddy covariance*, per la quale si rimanda a lavori di riferimento (Baldocchi, 2003; Aubinet *et al.*, 2000; Marino *et al.*, 2005) ma, piuttosto, quella di descrivere lo stato di questo tipo di misure nel nostro Paese e di fornire alcuni risultati esemplificativi e riassuntivi.

L'accumulo di carbonio da parte di una foresta corrisponde alla sua produttività netta di ecosistema (NEP), pari all'incremento di biomassa dei tessuti vivi, soprattutto legnosi, e di sostanza organica del terreno (humus), nell'arco di un dato periodo di tempo, solitamente un anno. La misura della NEP richiede quindi inventari successivi ed è limitata dalla sua laboriosità e, aspetto non secondario, dal fatto che è distruttiva. Ma poiché la NEP può anche essere considerata pari alla fotosintesi totale del bosco (GPP, Produttività Primaria Lorda) al netto della respirazione delle piante (autotrofa, R_A), della respirazione eterotrofa, cioè della decomposizione della lettiera epigea e ipogea e della sostanza organica del suolo (R_H), la sua determinazione può essere ottenuta misurando i processi di scambio gassoso (cioè la risultante tra fotosintesi e respirazione) tra copertura forestale ed atmosfera.

$$NEP = GPP - (R_A + R_H)$$

Gli scambi di carbonio tra l'ecosistema forestale e l'atmosfera vengono ormai frequentemente misurati con la tecnica della correlazione turbolenta (*eddy covariance*). Rispetto ad altre tecniche tradizionali, la tecnica non disturba l'ambiente al di sopra delle coperture e consente di effettuare misure continue. Essa ha le seguenti caratteristiche (Matteucci e Scarascia Mugnozza, 2007): i) consente la misura integrata degli scambi di carbonio e vapore acqueo su un'area estesa, rappresentativa di aree forestali; ii) fornisce stime di bilancio del carbonio (NEP) senza essere distruttiva; iii) può essere condotta su base temporale continua; iv) rispetto alla quantità ed al dettaglio dei dati forniti è relativamente poco costosa. Tra gli svantaggi e le incertezze si possono elencare: i) è richiesta una copertura abbastanza omogenea; ii) è di affidabilità limitata in condizioni di forte stabilità atmosferica, in particolare durante alcune notti; iii) presenta problemi in condizioni orografiche complesse.

L'applicazione della tecnica per la stima dei flussi di carbonio prevede l'installazione di una serie di strumentazioni all'interno dell'ecosistema oggetto di studio. La stazione micrometeorologica è costituita essenzialmente da due strumenti a risposta veloce, che consentono la stima diretta dei flussi di carbonio (e anche di vapore acqueo), e da altri sensori a risposta lenta per la misura di variabili ambientali di riferimento (temperatura, precipitazione radiazione, ecc.). Gli strumenti a risposta veloce sono l'anemometro ultrasonico, che rileva con frequenza elevata le tre componenti della velocità del vento, e un analizzatore per la misura della concentrazione di CO₂ e il vapore acqueo. L'anemometro ultrasonico e l'ingresso del tubo di campionamento per la CO₂ (o il sensore stesso se l'analizzatore è del tipo a cammino aperto) vanno posizionati alcuni metri sopra le chiome delle piante, generalmente facendo uso di torri a piani calpestabili. Nel caso di analizzatore a cammino chiuso, una pompa aspira l'aria atmosferica fino all'analizzatore. I dati vengono raccolti da un data-logger o da un computer portatile e successivamente elaborati.

Spesso, i siti dotati di questa strumentazione sono caratterizzati da un'elevata intensità di attività sperimentali, inclusi gli studi basati su tecniche di campionamento di biomassa e sostanza organica del suolo e altri che li rendono siti di ricerca intensiva sulla funzionalità e l'ecologia delle foreste.

3. RISULTATI

La prima stazione sperimentale di misura dello scambio netto di carbonio su foreste in Europa è stata installata in Italia, tra il 1993 ed il 1994, nella faggeta di Collelongo, ad opera dei ricercatori del Dipartimento di Scienze dell'Ambiente Forestale e delle sue Risorse dell'Università degli Studi della Tuscia, coordinati dal prof. Valentini e dal prof. Scarascia Mugnozza (Valentini *et al.*, 1996). Attualmente in Italia, sono attive 15 stazioni su foreste, dal Nord sino alla Calabria (tabella 1). Le stazioni sono installate su popolamenti forestali di diversa tipologia, da fustaie di faggio, quercia, di conifere miste, sia coetanee che disetannee, a cedui di leccio e cerro, a boschi in conversione, a piantagioni forestali sino a popolamenti di macchia mediterranea (tabella 1). Diverse di queste stazioni si caratterizzano per un approccio di ricerca a lungo termine che consente di valutare il ruolo degli andamenti climatici sul bilancio di carbonio a scala di ecosistema, nonché l'impatto di eventuali eventi estremi o di annate anomale. Molte delle stazioni ora attive in Italia sono inserite nella Rete del progetto FISR CarboItaly (Papale, 2007). Le Istituzioni coinvolte in questo tipo di ricerche sono diverse a partire da Istituti di ricerca del CNR (IBAF, IBIMET e ISAFOM), dipartimenti universitari (DISAFRI, Univ. della Tuscia), settori ricerca e ambiente di Amministrazioni Provinciali e Regionali (Prov. Bolzano, Fondazione Edmund Mach, I-PLA) e anche il Centro Comune di Ricerca della Commissione Europea (JRC, Ispra).

La tecnica misura fornisce lo scambio netto di carbonio a partire da dati raccolti ad alta frequenza (10 - 20 misure al secondo) e successivamente mediati per ogni mezz'ora. I dati possono poi essere cumulati su base giornaliera e per giorni successivi.

In figura 1 vengono riportati i dati giornalieri e cumulati misurati nella faggeta di Collelongo (AQ) nell'anno 2005. La convenzione micrometeorologica riporta i dati di assorbimento di carbonio da parte dell'ecosistema con segno negativo (carbonio sottratto all'atmosfera), mentre i dati di emissione sono riportati con il segno opposto (carbonio rilasciato in atmosfera).

È possibile apprezzare la dinamica dello scambio di carbonio di un ecosistema deciduo, montano, coetaneeforme e che si può considerare a maturità. Durante i primi mesi dell'anno, sino a circa metà Aprile, è presente solamente il termine di respirazione di mantenimento della biomassa e la respirazione eterotrofa che, per le basse temperature e il suolo coperto di neve, è limitata. In questo periodo, lo scambio netto giornaliero è di circa $0.5 \pm 1 \text{ gC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ (fig. 1). Intorno al 20 Aprile, il trasferimento di sostanze di riserva tra le varie componenti (soprattutto gemme), il primo accrescimento delle radici fini, porta ad un picco di emissione di carbonio da respirazione fino a $3.5 \pm 4 \text{ gC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$, valore che rimarrà il più alto dell'anno. All'inizio di Maggio la faggeta comincia a spiegare le foglie e ad assorbire carbonio. Il primo giorno nel quale la fotosintesi della faggeta (GPP) è maggiore della respirazione, è il 10 Maggio. L'indice di area fogliare (LAI) a quella data è già circa $3 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ (D'Andrea, 2006). Da quel giorno, la faggeta aumenta il suo assorbimento giornaliero, grazie allo sviluppo del LAI e alle condizioni di temperatura, irradiazione e disponibilità idrica. Il massimo di assorbimento di carbonio,

con $-9 \div -10 \text{ gC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$, si raggiunge tra il primi di Giugno e metà Luglio che si conferma come il periodo ottimale per la faggeta (Matteucci, 1998). Tra metà Luglio e metà Agosto, l'assorbimento è tendenzialmente minore a causa di un periodo di aridità e alle alte temperature. A Settembre, la pioggia, le temperature e l'inizio dei processi di senescenza, portano ad un minor scambio netto di carbonio, sia per minor fotosintesi che anche per una maggiore respirazione che, in particolare per il suolo, viene favorita dalla buona disponibilità idrica. L'ecosistema passa da essere assorbitore (*sink*) ad emettitore (*source*) di carbonio il 15 Ottobre 2005, con un valore di circa $1 \text{ gC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ (fig. 1). Da notare come, da metà Ottobre a fine Novembre, la respirazione si più sostenuta rispetto a quella del periodo Gennaio – Marzo. Questo è in parte dovuto alle temperature più alte ma anche alla ampia disponibilità di lettiera al suolo in seguito alla caduta delle foglie. Nel 2005, su base annuale, il sistema ha assorbito $-645.7 \text{ gC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$, pari a circa 6.5 tonnellate di carbonio ad ettaro. Da segnalare che questa misura è stata ottenuta con il 78% di dati direttamente misurati, mentre la restante parte è stata ricostruita con tecniche di *gap-filling*, secondo gli standard del progetto europeo CarboEurope-IP (Reichstein *et al.*, 2005; Papale *et al.*, 2006).

Per confronto, in figura 2, si riportano gli andamenti misurati in una piantagione di pino laricio della Sila Greca nel corso del 2006. L'ecosistema è sempreverde e, pur situato in montagna, a 1100 m s.l.m., può godere di condizioni meteorologiche relativamente favorevoli. Per questo motivo sono stati misurati solamente 36 giorni in cui la pineta ha emesso carbonio verso l'atmosfera, 34 dei quali prima del 3 Marzo 2006. A parte qualche picco tra fine Maggio ed inizio Giugno, i valori massimi di assorbimento sono risultati leggermente minori rispetto a quelli della faggeta ($-8 \text{ gC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$) ed il periodo ottimale è anticipato tra inizio Maggio e metà Giugno (fig. 2). In estate, relativamente secca e calda, l'assorbimento cala a valori di $-3 \div -4 \text{ gC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ mentre in autunno e primi mesi invernali l'ecosistema continua ad essere attivo ma a tassi più bassi ($-1.5 \div -2.5 \text{ gC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$). Su base annuale la pineta risulta avere assorbito

circa 10 tC per ettaro (60% valori misurati direttamente, 40% *gap-filling*). Per questo sito il valore non si distanzia di molto da quello riportato in un precedente lavoro per il 2003-2004 (Marino *et al.*, 2005). Tali valori risultano notevolmente alti e sono in corso studi per verificarne l'incertezza. In particolare si segnala che l'andamento topografico del sito potrebbe portare ad una sottostima dei valori notturni di respirazione per il fenomeno dell'advezione (Aubinet *et al.*, 2003) e, conseguentemente, ad una sovrastima dell'assorbimento annuale.

4. CONCLUSIONI

I risultati provenienti dai vari siti installati in Italia, che formano una rete estesa per lo studio della funzionalità degli ecosistemi forestali, hanno consentito alla ricerca forestale italiana di assumere un ruolo di rilievo a livello europeo e mondiale (Valentini *et al.*, 2000; Ciais *et al.*, 2005; Magnani *et al.*, 2007). Sulla base di serie pluriennali di dati, la capacità di sequestrare carbonio da parte delle nostre foreste (NEP) è stata mediamente stimata intorno a $4 \text{ tC ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (Matteucci e Scarascia Mugnozza, 2007). Le oscillazioni interannuali sono molto ampie in funzione dell'andamento climatico ed in risposta agli stress. Ci sono, ovviamente, anche notevoli differenze in funzione della specie forestale, alla fertilità e all'impatto degli interventi gestionali.

Il monitoraggio continuo e di lungo termine delle foreste potrà fornire informazioni interessanti sui processi di adattamento e/o acclimatazione, consentendo di determinare quanto e se l'assorbimento di carbonio sia duraturo e non transiente. Inoltre, questo monitoraggio permetterà di verificare in termini qualitativi e quantitativi l'impatto degli eventi estremi e della gestione forestale sul ciclo del carbonio.

RINGRAZIAMENTI

Il presente lavoro è stato svolto nell'ambito del progetto FISR CarboItaly.

Sito	Coordinate	Altitudine m s.l.m.	Ecosistema	Anno installazione	Ente responsabile	Contatto
Collelongo (AQ)	41°52' N 13°38' E	1560	Fustaia di faggio coetaneiforme, 120 anni	1993(94) -	CNR-IBAF (Univ. Tuscia, DISAFRI sino al 2003)	Giorgio Matteucci giorgio.matteucci@isafom.cs.cnr.it
Castelporziano (RM)	41°42' N, 12°22' E	15	Lecceta in conversione, 55 anni	1996 -	Univ. Tuscia – DISAFRI	Dario Papale darpap@unitus.it
Renon (BZ)	46°35' N, 11°26' E	1730	Bosco misto disetaneo (peccio, pinto silverstre)	1997 -	Prov. di Bolzano, Ufficio Ambiente	Stefano Minerbi stefano.minerbi@provincia.bz.it
Arca di Noè (SS)	40°36' N, 8°09' E	28	Macchia mediterranea bassa	1999 -	CNR-IBIMET	Pierpaolo Duce p.duce@ibimet.cnr.it
San Rossore (PI)	43°43' N, 10°17' E	4	Piantagione di pino marittimo, 35 anni	1999 -	Joint Research Center, Ispra	Guenther Seufert guenther.seufert@jrc.it
Roccarespanpani (VT)	42°24' N, 11°55' E	234	Ceduo di cerro, tagliato nel 1998	2000 -	Univ. Tuscia – DISAFRI	Dario Papale darpap@unitus.it

(segue)

(segue Tabella 1)

La Mandria (TO)	45°09' N, 7°34' E	350	Querceto misto farnia e rubra	2001 -	IPLA (TO)	Fabio Petrella petrella@ipla.org
Nonantola (MO)	44°41' N, 11°05' E	25	Piantagione di lati- foglie nobili (effet- tuata nel 1992)	2001 -	CNR-IBIMET	Franco Miglietta f.miglietta@ibimet.cnr.it
Isola di Pianosa (LI)	42°05' N, 10°04' E	18	Macchia seconda- ria	2002 -	CNR-IBIMET	Francesco Vaccari f.vaccari@ibimet.cnr.it
Lavarone (TN)	45°57' N, 11°16' E	1353	Bosco misto dise- taneo (abete, pec- cio, faggio)	2002 -	Fondazione Edmund Mach	Damiano Gianelle gianelle@cealp.it
Roccarespampani (VT)	42°23' N, 11°55' E	224	Ceduo di cerro, 18 anni dal taglio	2002 -	Univ. Tuscia – DISAFRI	Dario Papale darpap@unitus.it
Tolfa (VT)	42°11' N, 11°55' E	473	Macchia a corbez- zolo	2003 -	Univ. Tuscia – DISAFRI	Dario Papale darpap@unitus.it
Bonis (Sila, CS)	39°28' N; 16°31' E	1100	Piantagione di pino laricio di 43 anni	2003 -	CNR-ISAFOM e IBAF	Giorgio Matteucci giorgio.matteucci@isafom.cs.cnr.it
Lecceto (GR)	43°18' N, 11°16' E	314	Ceduo matricinato di leccio, circa 18 anni	2005 -	CNR-IBIMET	Lorenzo Genesio Lorenzo.genesio@ibimet.cnr.it
Boschi di Carre- ga (PR)	44°43' N; 10°12' E	230	Querceto rovere- cerro in conversio- ne, 50 anni	2007 -	CNR-IBAF	Giorgio Matteucci giorgio.matteucci@isafom.cs.cnr.it
Zerbolò, Parco del Ticino (PV)	45°12' N, 9°03' E	60	Pioppeto (misure effettuate tra i 10 ed i 15 anni di età)	2002 – 2006	Joint Research Center, Ispra	Guenther Seufert guenther.seufert@jrc.it

Tabella 1. Denominazione, localizzazione, principali caratteristiche, istituzione responsabile e persona di contatto dei siti forestali italiani nei quali si effettuano misure di scambio netto di carbonio con la tecnica eddy covariance. I siti sono tutti attivi ad eccezione di Zerbolò che ha interrotto le misure nel 2006 dopo il taglio. L'istituzione responsabile e la persona di contatto sono quelli che risultano nel database dei progetti CarboItaly e CarboEurope-IP (<http://gaia.agraria.unitus.it/database>).

Table 1. Name, coordinates, main features, responsible institution and contact's person of italian forest sites where canopy fluxes of carbon are measured with the eddy covariance technique. The sites are all active except for Zerbolò, that closed measurements in 2006 after logging. Responsible institutions and contact's persons are those reported in the database of CarboItaly and CarboEurope-IP projects (<http://gaia.agraria.unitus.it/database>).

Tableau 1. Dénomination, localisation, principales caractéristiques, institution responsable et personne de contacte des sites forestiers italiens dans lesquels s'effectuent des mesures d'échange net de carbone avec la technique *eddy covariance*. Les sites sont tous actifs à l'exception de Zerbolò qui a interrompu les mesures en 2006 après la coupe. L'institution responsable et la personne de contacte sont qui résultent dans les database des projets CarboItaly et CarboEurope-IP (<http://gaia.agraria.unitus.it/database>).

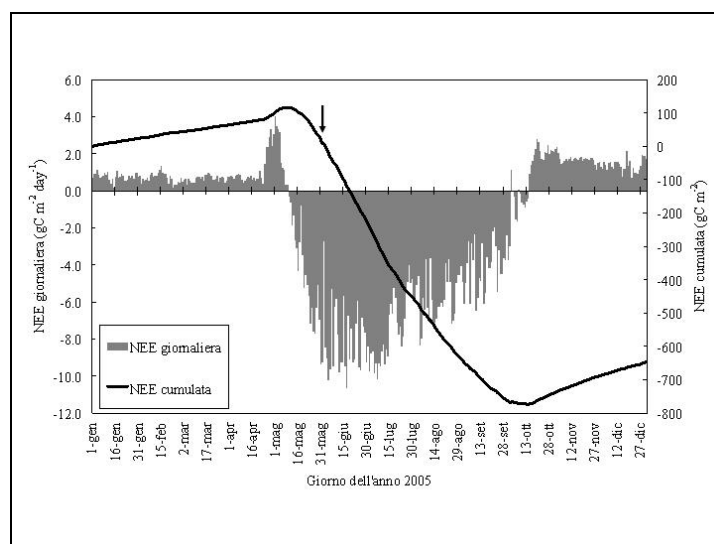


Figura 1. Andamenti dello scambio netto giornaliero ($\text{gC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$, asse ordinate di sinistra, barre in grigio) e cumulato (gC m^{-2} , asse ordinate di destra, linea continua nera) di carbonio misurati nella faggeta di Collelongo (AQ) nel corso del 2005.

Figure 1. Trends of daily net carbon exchange ($\text{gC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$, left y axis, grey bars) and cumulated values (gC m^{-2} , right y axis, black line) measured in the Collelongo (AQ) beech forest during 2005.

Figure 1. Trend de l'échange net journalier ($\text{gC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$, gauche y asse, barres en gris) et cumulé (gC m^{-2} , droite y asse, ligne continue noire) de carbone mesurés dans l'hétraie de Collelongo (AQ) dans le cours de 2005.

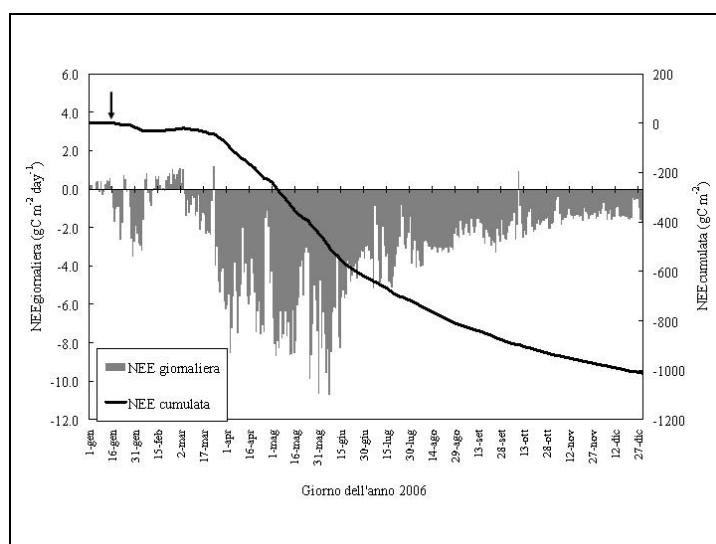


Figura 2. Andamenti dello scambio netto giornaliero ($\text{gC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$, asse ordinate di sinistra, barre in grigio) e cumulato (gC m^{-2} , asse ordinate di destra, linea continua nera) di carbonio misurati nella pineta del Bonis (CS) nel corso del 2006.

Figure 2. Trends of daily net carbon exchange ($\text{gC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$, left y axis, grey bars) and cumulated values (gC m^{-2} , right y axis, black line) measured in the Bonis pine forest during 2005.

Figure 2. Trend de l'échange net journalier ($\text{gC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$, gauche y asse, barres en gris) et cumulé (gC m^{-2} , droite y asse, ligne continue noire) de carbone mesurés dans la forêt de pin de Bonis (CS) dans le cours de 2005.

SUMMARY

CARBON BUDGET OF MEDITERRANEAN FOREST ECOSYSTEMS

The paper presents the research activities on carbon budget of forest ecosystems in Italy making use of the eddy covariance technique. The technique quantifies the net ecosystem exchange that represents the balance between carbon absorbed through photosynthesis and released via respiratory and decomposition processes. The first experimental site of this kind in Europe was installed in Italy, in the Collelongo beech forest, in 1993-94. Nowadays, flux towers are installed in 15 forest ecosystem types, ranging from mediterranean macchia to broadleaf and coniferous high stands, coppice stands and tree plantations. Most of the towers are included in the network of the FISIR project CarboItaly.

Research activities ranged from quantification of ecosystem carbon balance, its interannual variability and responses to climate variables. In the future, it will be possible to investigate the medium- and long-term dynamics of carbon balance of some Italian forest ecosystems, also in response to climate change and forest management.

RÉSUMÉ

LE BUDGET DU CARBONE EN ECOSYSTEMES FORESTIERS MEDITERRANEENS

L'article présente des activités de recherche en cours pour la quantification du budget de carbone d'écosystèmes forestiers italiens par la technique de mesure directe des échanges à échelle de couverture (*eddy covariance*). La

technique mesure l'échange net d'écosystème qui quantifie le budget annuel parmi carbone absorbé par la photosynthèse et le émis des procès respirés et de décomposition. En Italie, où, en 1993-94 dans l'hétraie de Collelongo (Aq) elle a été installée les première site européennes de ce genre, sont actives 15 sites sur écosystèmes forestiers différents: de la maquis méditerranéenne, à fûtaie de espèces caduques et des conifères, à taillis et forêt en conversion jusqu'à à plantations forestières. Tres des sites son part du réseau de projette FISIR CarboItaly.

Les recherches ont permis de déterminer le budget de carbone de différents écosystèmes forestiers italiens, d'en étudier les réponses aux paramètres climatiques et la variabilité interannuel. Les continuation de ces recherches permettra d'obtenir des importants résultats sur la dynamique à moyen- et long-terme du budget du carbone de quelques forêts italiennes, même dans répondu aux changements climatiques et aux activités de gestion forestière.

BIBLIOGRAFIA

- Apps M.J., Price D.T., 1996 - *Introduction*. In: «Forest Ecosystems. Forest management and the Global Carbon Cycle», a cura di Apps M.J., Price D.T. NATO ASI Series Vol. I 40, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York. Pp. 1-15.
- Aubinet M., Grelle A., Ibrom A., Rannik U., Moncrieff J., Foken T., Kowalski A.S., Martin P.H., Berbigier P., Bernhofer C.H., Clement R., Elbers J., Granier A., Grunwald T., Morgenstern K., Pilegaard K., Rebmann C., Snijders W., Valentini R. And Vesala T., 2000 - *Estimates of the Annual Net Carbon and Water Exchange of Forests: The EUROFLUX Methodology*. Advances in Ecological Research 30: 113-175.

- Aubinet M., Heinesch B., Yernaux M., 2003 - *Horizontal and vertical CO₂ advection in a sloping forest*. *Boundary-Layer Meteorology* 108: 397-417.
- 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.
- Calamini G., Gregori E., Hermanin L., Lopresti R., Manolacu M., 1983 - *Studio di una faggeta dell'Appennino pistoiese: biomassa e produzione primaria netta epigea*. *Annali Istituto Sperimentale Studio e Difesa del Suolo XIV*: 193-214.
- Cannell M.G.R. (a cura di), 1982 - *World Forest Biomass and Primary Production Data*. Academic Press, London-New York. Pp. 1-391.
- Ciais P., Reichstein M., Viovy N., Granier A., Ogee J., Allard V., Aubinet M., Buchmann N., Bernhofer C., Carrara A., Chevallier F., Noblet N.D., Friend A.D., Friedlingstein P., Grünwald T., Heinesch B., Keronen P., Knohl A., Krinner G., Loustau D., Manca G., Matteucci G., Miglietta F., Ourcival J.M., Papale D., Pilegaard K., Rambal S., Seufert G., Soussana J.F., Sanz M.J., Schulze E.D., Vesala T., Valentini R., 2005 - *Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003*. *Nature* 437: 529-533.
- D'Andrea E., 2006 - *Analisi dell'indice di area fogliare (LAI) in una faggeta abruzzese*. Tesi di Laurea di Primo Livello, Università degli Studi della Tuscia, Viterbo.
- De Angelis P., Scarascia Mugnozza G., 1995 - *Cambiamenti ambientali a scala globale: il ruolo degli ecosistemi forestali*. *L'Italia Forestale e montana* 5: 457-480.
- Ehleringer J.R., Field C.B. (a cura di), 1993 - *Scaling physiological processes: from leaf to globe*. Academic Press, San Diego, Pp. 1-388.
- Jarvis P.G., 1995 - *Scaling processes and problems*. *Plant, Cell and Environment* 18: 1079-1089.
- Leonardi S., Rapp M., 1980 - *Biomasse et composition minerale de Quercus ilex L. du Monte Minardo (Etna)*. *Archivio Botanico Biogeografico Italiano* 56 (1-2): 70-84.
- Lieth H., Whittaker R.H. (a cura di), 1975 - *Primary productivity of the biosphere*. *Ecological Studies* 14, Springer-Verlag, Berlin, 339 pp.
- Luyssaert S., Inglisma I., Jung M., Richardson A.D., Reichstein M., Papale D., Piao S.L., Schulze E.D., Wingate L., Matteucci G., Aragao L., Aubinet M., Beer C., Bernhofer C., Black K.G., Donal D., Bonnefond J.-M., Chambers J., Ciais P., Cook B., Davis K.J., Dolman A.J., Gielen B., Goulden M., Grace J., Granier A., Grelle A., Griffis T., Grunwald T., Guidolotti G., Hanson P.J., Harding R., Hollinger D.Y., Huytra L.R., Kolari P., Kruijt B., Kutsch W., Lagergren F., Laurila T., Law B.E., Le Maire G., Lindroth A., Loustau D., Malhi Y., Mateus J., Migliavacca M., Misson L., Montagnani L., Moncrieff J., Moors E., Munger J.W., Nikinmaa E., Ollinger S.V., Pita G., Reimann C., Roupsard O., Saigusa N., Sanz M.J., Seufert G., Sierra C., Smith M.-L., Tang J., Valentini R., Vesal T., Janssens I.A., 2007 - *CO₂ balance of boreal, temperate, and tropical forests derived from a global database*. *Global Change Biology* 13: 1-29.
- Magnani F., Mencuccini M., Borghetti M., Berbigier P., Berninger F., Delzon s., Grelle A., Hari P., Jarvis P., Kolari P., Kowalski A.S., Lankreijer H., Law B., 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.
- 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.
- Matteucci G., 1998 - *Bilancio del Carbonio in una Faggeta dell'Italia Centro-Meridionale: Determinanti Ecofisiologici, Integrazione a Livello di Copertura e Simulazione dell'Impatto dei Cambiamenti Ambientali*. Tesi di dottorato, Università degli Studi di Padova.
- Matteucci G., Scarascia Mugnozza G., 2007 - *Ecosistemi forestali e mitigazione dei cambiamenti ambientali: sequestro di carbonio in foreste italiane*. In: «Clima e cambiamenti climatici: le attività di ricerca del CNR», a cura di Carli B., Cavarretta G., Colacino M., Fuzzi S. ISBN 978-88-8080-075-0, pp. 709-712.
- Papale D., 2007 - *Il Progetto CARBOITALY: una rete nazionale per la misura dei sink forestali e agricoli italiani e lo sviluppo di un sistema di previsione dell'assorbimento dei gas serra*. *Forest@3* (2): 165-167.
- Papale D., Reichstein M., Aubinet M., Canfora E., Bernhofer C., Kutsch W., Longdoz B., Rambal S., Valentini R., Vesala T., Yakir D., 2006 - *Towards a standardized processing of Net Ecosystem Exchange measured with eddy covariance technique: algorithms and uncertainty estimation*. *Biogeosciences*, 3, 571-583.
- Reichle D.E. (a cura di), 1981 - *Dynamic Properties of Forest Ecosystems*. IBP 23, Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 683.
- Reichstein M., Falge E., Baldocchi D., Papale D., Aubinet M., Berbigier P., Bernhofer C., Buchmann N., Gilmanov T., Granier A., Grunwald T., Havrankova K., Ilvesniemi H., Dalibor J., Knohl A., Laurila T., Lohila A., Loustau D., Matteucci G., Meyer T., Miglietta F., Ourcival J.-M., Puntanen J., Rambal S., Rotenberg E., Sanz M.J., Tenhunen J., Seufert G., Vaccari F., Vesala T., Valentini R., 2005 - *On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: review and improved algorithm*. *Global Change Biology* 11: 1424-1439.
- Scarascia Mugnozza G., Bauer G., Persson H., Matteucci G., Masci A., 2000 - *Tree biomass, growth and nutrient pools*. In: «Carbon and Nitrogen Cycling in European forest Ecosystems», a cura di Schulze E.-D. *Ecological Studies* 142, Springer Verlag, Heidelberg. Pp. 49-62.
- Susmel L., Viola F., Bassato G. (a cura di), 1976 - *Ecologia della lecceta del Supramonte di Orgosolo. III. Produzione primaria, produzione secondaria, condizioni attuali e possibilità di conservazione*. CEDAM - Padova. Pp. 1-261.
- Tirone G., Dore S., Matteucci G., Greco S., Valentini R., 2003 - *Evergreen Mediterranean forests: carbon and water fluxes, balances, ecological and ecophysiological determinants*. In: «Fluxes of Carbon, Water and Energy of European Forests», a cura di Valentini R. *Ecological Studies* 163, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, pp. 125-149.
- 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., Matteucci G., Dolman A.J., Schulze E.-D., Reimann C., Moors E.J., Granier A., Gross P., Jensen N.O., Pilegaard K., Lindroth A., Grelle A., Bernhofer Ch., Grünwald T., Aubinet M., Ceulemans R., Kowalski A.S.,

Vesala T., Rannik Ü., Berbigier P., Loustau D., Guðmundsson J., Thorgeirsson H., Ibrom A., Morgenstern K., Clement R., Moncrieff J., Montagnani L., Minerbi S., Jarvis P.G., 2000 - *Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests*. *Nature*, 404: 861-865.

Visonà L., Naviglio L., Simonetto L., Azzolini I., Giovannardi R., 1975 - *Researches on beech forest. I Structure and biomass of the beechwood in the Mount Terminillo IBP station*, Monti Reatini, Lazio. *Annali di Botanica* 34: 143-170.