

Il calcolo dei crediti di carbonio: il modello CO2FIX v. 3.1 applicato ad una faggeta sotto *Forest Management* nel sud Italia

Scarfò F*, Mercurio R

Dipartimento di Gestione dei Sistemi Agrari e Forestali, Feo di Vito, Reggio Calabria (Italia) - *Corresponding Author: Francesco Scarfò (francesco.scarfo@unirc.it).

Abstract: Carbon credit accounting: the model CO2FIX v. 3.1 applied to a beech stand under Forest Management in southern Italy. Forests play an important role in the mitigation of the effects of climate change thanks to their ability to sequester carbon dioxide from atmosphere. The assessment of the carbon fixed by forest ecosystems (stocks) and the carbon accumulated over a period of time (sinks) is focal for environmental protection scopes, as well as for accessing the carbon credits market. The main purpose of this work was to estimate (using the ecosystem-level model CO2FIX v. 3.1) the equivalent carbon dioxide ($\text{Mg CO}_2 \text{ eq ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$) fixed by a beech stand located in southern Italy during the First Commitment Period (2008-2012) under Forest Management (art. 3.4 of the Kyoto Protocol). The model was applied over a forest district using local data obtained from both literature and field analysis. Over the simulated period, sink values of $9.77 \text{ Mg C ha}^{-1}$ ($1.95 \pm 0.91 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ on average) were obtained, corresponding to an accountable value of $5.36 \text{ Mg CO}_2 \text{ eq ha}^{-1}$ and according to the possibility to accredit only the 15% of the real value (Decision 16/CMP.1 UNFCCC). Sink values estimated with the model applied barely diverge from those obtained by similar studies on beech forests, that have been briefly reviewed and discussed here.

Keywords: Beech, CO2FIX v. 3.1, Carbon stock, Carbon sink, Kyoto Protocol.

Received: Mar 04, 2009; Accepted: Apr 30, 2009

Citation: Scarfò F, Mercurio R, 2009. Il calcolo dei crediti di carbonio: il modello CO2FIX v. 3.1 applicato ad una faggeta sotto *Forest Management* nel sud Italia. Forest@ 6: 215-228 [online: 2009-06-30] URL: <http://www.sisef.it/forest@/>.

Introduzione

Le foreste hanno un ruolo importante nel ciclo globale del carbonio (C - IPCC 2007). Inoltre la biomassa presente negli alberi dei nostri boschi rappresenta, assieme a quella nel suolo, la frazione più importante di anidride carbonica (CO_2) fissata negli ecosistemi terrestri (Bravo 2007). Il C circola fra gli oceani, la biosfera e l'atmosfera. Le attività umane come lo sfruttamento di combustibili fossili e la deforestazione influenzano la concentrazione di CO_2 nell'atmosfera (IPCC 2001). Se ne deduce che una stima precisa della biomassa arborea (fitomassa) è essenziale per poter valutare il contributo delle foreste al bilancio planetario del C (Pilli et al. 2006). La quantificazione del C in foresta deve essere fatta tenendo conto dei 5 *pools* indicati dall'*United Nation Framework Convention on Climate Change* (UNFCCC 2005): biomassa epigea, biomassa ipogea, legno morto, lettiera e C or-

ganico nel suolo (SOC, *Soil Organic Carbon*). La concentrazione di C nel suolo è più elevata che nell'atmosfera e ciò indica l'importanza di questo *pool* di C. Inoltre, vi sono studi, come quello di Tonolli & Salvagni (2007) in Italia, che confermano, se pur con un certo margine di incertezza, il contributo quasi paritetico fra il SOC e la biomassa epigea. Nonostante ciò, a causa delle ancora scarse informazioni riguardo al SOC, è possibile considerare nullo il contributo allo scambio di C di questo *pool* ai fini della contabilità del Protocollo di Kyoto, purché si dimostri che esso non rappresenti una fonte di emissione di CO_2 in atmosfera. La capacità delle foreste di fissare la CO_2 atmosferica è fondamentale sia ai fini della conoscenza e della gestione degli ecosistemi, sia per gli aspetti economici che da essi derivano (e.g., mercato dei crediti di carbonio disciplinato dal PK). La contabilizzazione delle foreste come *sink* di C è una sfida,

ma le stime comportano alti gradi di incertezza (Grace 2004) e di discrepanza fra metodi (Houghton 2003). Houghton (2003) suggerisce che le differenze fra le varie stime del *sink* di C ottenute con metodi diversi non sono dovute ad alti livelli di incertezza, ma semplicemente a conteggi incompleti. Secondo Bravo (2007) gli strumenti attualmente riconosciuti dalla comunità scientifica per quantificare la fissazione del C nella fitomassa sono riconducibili a: 1) inventari forestali a piccola o a grande scala); 2) stime del cambio di superficie; 3) modelli empirici: tavole dendrometriche (regionali o locali), fattori di espansione della biomassa (*Biomass Expansion Factors*, BEFs), relazioni allometriche; 4) modelli empirici di crescita e/o di produzione (a scala di ecosistema, di popolamento o del singolo individuo); 5) telerilevamento. A queste vanno aggiunte le tecniche di micrometeorologia che fanno uso di torri (*eddy covariance towers*) per la valutazione dei flussi di C fra ecosistema ed atmosfera.

La fissazione o capacità di *sink* degli ecosistemi forestali è collegata con le attività addizionali indicate dall'articolo 3.4 del Protocollo di Kyoto (PK) che prevedono quale strumento attuativo la gestione forestale (*Forest Management*, FM). Secondo l'IPCC (2003) le terre classificabili come soggette a FM sono quelle che corrispondono ai requisiti richiesti dalla definizione di bosco adottata in sede nazionale e su cui sono svolte le attività di gestione forestale indicate dal nostro Paese. Il metodo per la contabilizzazione di C per le attività di FM è detto *gross-net accounting* (Schlamadinger et al. 2007) e considera esclusivamente variazioni di *stock* di C dovute alle differenze tra emissioni (*source*) e prelievi (*sink*) durante un periodo di conteggio, senza che queste siano confrontate con le variazioni dello *stock* avvenuto in un periodo (o anno) di riferimento. Il *sink* totale generato da questa tipologia di attività addizionale può essere contabilizzato ai fini del mercato dei crediti solo sino ad esaurimento del valore assegnato all'Italia dalla Decisione 8/CMP.2 (UNFCCC 2006) e che è stato calcolato applicando un fattore di sconto dell'85% alle stime presentate dal Paese al Segretariato dell'UNFCCC. Sebbene un tale fattore di sconto non sia previsto dalle regole successive di calcolo dei *sink* forestali tuttavia è opportuno considerare il 15% dell'assorbimento netto come quantità utilizzabile per crediti di carbonio dalle attività di FM, anche in considerazione di possibili procedure di ricalcolo e aggiustamento.

Lo scopo di questo lavoro è quello di quantificare i crediti di CO₂ equivalenti ad ettaro (CO₂ eq ha⁻¹) ge-

nerabili dalle attività di FM di un bosco di faggio nel Primo Periodo di Impegno (*1st Commitment Period*) 2008-2012 con il modello CO2FIX v. 3.1. Questo modello rappresenta una fra le più moderne applicazioni per lo studio dei flussi di carbonio fra ecosistemi forestali ed atmosfera, inoltre, esso consente di quantificare dinamicamente il sequestro potenziale di C, nei 5 *pools* stabiliti dall'UNFCCC.

Si stima inoltre la potenzialità dell'ecosistema oggetto dello studio, espressa come superficie di bosco necessaria per la produzione di crediti di carbonio da FM in quantità sufficiente a neutralizzare le emissioni CO₂ di 2 tipologie di automobili (Box 1).

Materiali e metodi

Area di studio

Lo studio è stato condotto in un bosco di faggio delle Serre calabre (Appennino Meridionale - Fig. 1) recentemente assestato (Contabile et al. 2008). I boschi di faggio di quest'area possono essere riferiti, secondo la classificazione tipologica di Mercurio & Spampinato (2006), alla tipologia "Faggeta ad agrifoglio" che corrisponde alle seguenti classificazioni Europee:

- 41.18 *Southern Italian beech forests*, CORINE (EU Commission 1991);



Fig. 1 - Localizzazione dell'area studio.

- 9210* *Apennine beech forests with Taxus and Ilex*, Natura 2000 (EU Commission 1999);
- 6.7.3 *Apennine-Corsican montane beech forests*, European Forest Types (EEA 2006).

Si tratta di faggete meso-termofile che presentano numerose specie nemorali in comune con quelle europee (*Sanicula europea*, ecc.) ed altre invece esclusive e tipiche delle faggete dell'Italia meridionale (*Anemome apennina* ecc.). Lo strato arboreo è dominato dal faggio. Lo strato arbustivo è scarsamente sviluppato e rappresentato esclusivamente da *Ilex aquifolium*. Lo strato erbaceo è caratterizzato da specie indicatrici di buona fertilità quali *Galium odoratum*, *Sanicula europea*, ecc. In questa tipologia si riscontrano popolamenti con alberi di buona forma, che in alcuni casi superano i 30 m. I suoli sono in genere evoluti, profondi, a tessitura franco-sabbiosa, acidi, ricchi di sostanza organica con alta capacità di ritenuta idrica, riferibili ai *Typic Dystrudept* (Inceptisols, USDA 1999). Secondo la classificazione di Rivas Martinez (1993) queste faggete rientrano nel macrolima temperato, ombrotipo iperumido, termotipo mesomediterraneo con caratteri di transizione. I principali parametri dendro-auxometrici vengono riportati nella Tab. 1.

Il modello CO2FIX v. 3.1

CO2FIX è un modello a scala di ecosistema (*ecosystem-level model*) che consente di calcolare il C in foresta della biomassa (fitomassa), del suolo e dei prodotti legnosi con cadenza annuale o per un periodo di riferimento (Masera et al. 2003).

Il modello è diviso in 6 moduli: biomassa (*biomass*), suolo (*soil*), prodotti (*products*), bioenergia (*bioenergy*), modulo finanziario (*finance module*) e di accreditamento (*carbon accounting module* - Fig. 2). In questo studio sono stati utilizzati i primi due moduli. CO2FIX fornisce risultati in forma grafica e di tabelle ed è stato scelto perché consente di: 1) calcolare e stimare lo stock di C; 2) calcolare e stimare i flussi di C fra ecosistema ed atmosfera e quindi la capacità di *sink* e di *source* quale conseguenze di un protocollo di gestione (utilizzazioni). Lo stock totale di C calcolato dal modello è dato dalla somma del C nella biomassa (C_{bio} che include la necromassa in piedi), del C nel suolo (C_{suolo} che include la necromassa giacente a terra) e dal C nei prodotti legnosi di cui non si è tenuto conto in questo lavoro ($C_{prodotti}$ - eqn. 1):

$$C_{stock\ tot} = C_{bio} + C_{suolo} + C_{prodotti}$$

Lo stock di C e i flussi nella fitomassa vengono calcolati come bilancio fra l'incremento corrente (CAI,

Tab. 1 - Caratteristiche della compresa Boschi di faggio: (valore minimo) media (valore massimo).

Forma di governo	Fustaia
Tipo di gestione passata	Tagli a scelta, tagli successivi
Densità (n. piante ha ⁻¹)	(409) 661 (913)
Diametro medio (cm)	(20.1) 30.55 (41.0)
Età (anni)	(80) 100 (120)
Altezza media (m)	(19) 22.1 (24.8)
Area basimetrica (m ² ha ⁻¹)	(26.5) 40.5 (54.5)
Massa all'anno 2008 (m ³ ha ⁻¹)	(333) 491.1 (753)
Superficie della compresa (ha)	223.95
Coordinate UTM WGS 84 33N (m)	617833 E - 4287660 N
Altitudine (m s.l.m.)	800-1000

Current Annual Increment) da una parte, e *turnover*, mortalità e utilizzazioni dall'altra parte, tramite un approccio a coorti (*cohort model approach* - Reed 1980). Una coorte può essere definita come un gruppo di alberi o di altre specie vegetali che presentano le stesse caratteristiche di accrescimento e per cui è possibile trattare come singola entità all'interno del modello (Vanclay 1989, Alder & Silva 2000). Grazie a questo tipo di approccio è possibile applicare il modello a popolamenti plurispecifici e/o pluristratificati o tenere conto, nel conteggio dello stock di C, di altri tipi di vegetazione (ad es., vegetazione arbustiva, muschi ecc., che in casi particolari contribuiscono per buona parte allo stock totale di C di un ecosistema forestale). Lo stock totale (C_b) è dato dalla sommatoria dello stock di ogni singola coorte ($C_{b_{it}}$ - eqn. 2):

$$C_b = \sum C_{b_{it}}$$

dove $C_{b_{it}}$ è il C stoccato nella fitomassa della coorte i al tempo t (Mg C ha⁻¹).

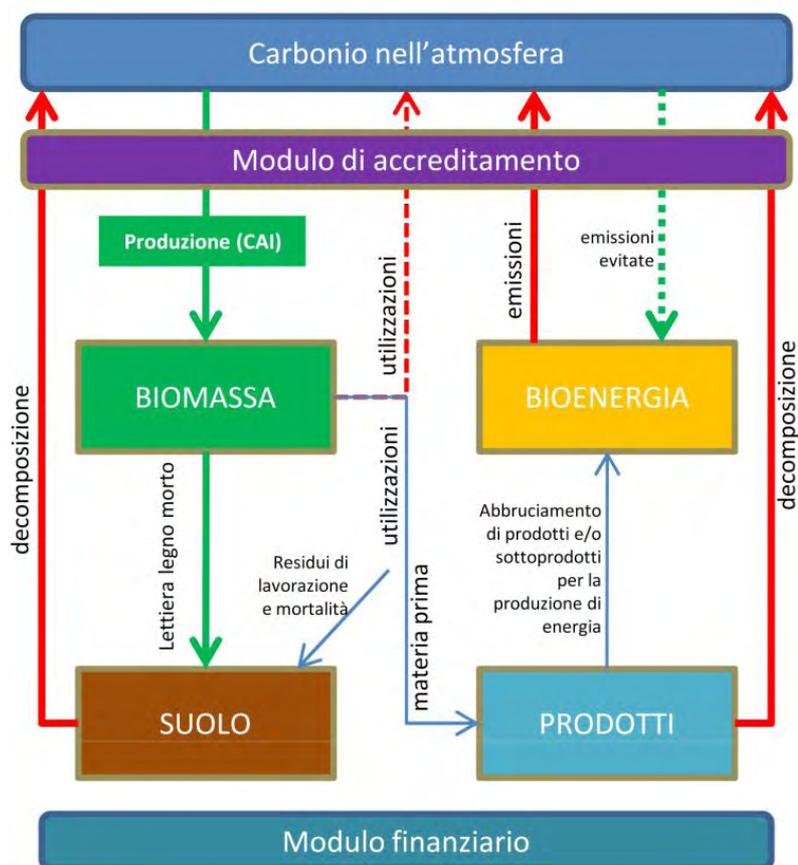
Per ogni nuovo periodo temporale ($C_{b_{it+1}}$) la fitomassa è calcolata come bilancio fra la fitomassa originaria ($C_{b_{it}}$), più l'incremento di fitomassa ($I_{b_{it}}$), meno il *turnover* dei rami, foglie e radici (T_{it}), meno la mortalità naturale (Mn_{it}), meno le utilizzazioni (U_{it}), meno la mortalità causata dalle operazioni di utilizzazione (Mu_{it} - eqn. 3):

$$C_{b_{it+1}} = C_{b_{it}} + Kc (I_{b_{it}} - Mn_{it} - T_{it} - U_{it} - Mu_{it})$$

dove Kc è una costante per trasformare la fitomassa in contenuto di C.

Per simulare $I_{b_{it}}$ il modello usa come *input* il CAI che può essere calcolato attraverso le tavole alsome-

Fig. 2 - I moduli di CO2FIX (Schelhaas et al. 2004, ridisegnato). Le frecce rappresentano i flussi di C: in verde le perdite dell'atmosfera (*Atm loss*); in rosso gli incrementi nell'atmosfera (*Atm inc*).



Tab. 2 - Parametri di input del modello CO2FIX per il calcolo del C nella fitomassa.

Tipo Parametri	Parametri del modello	Riferimento	Commenti
Parametri generali	Densità basale	Giordano (1983)	0.61 (Mg/m ³)
	Stock iniziale	Piano di gestione (Contabile et al. 2008)	491.1 m ³ ha ⁻¹ massa dendrometrica
	Periodo simulato	5 anni	2008-2012 primo periodo d'impegno
Parametri della fitomassa	Coefficienti ripartizione biomassa	Masci et al. 1997	I valori per il faggio sono stati utilizzati per parametrizzare la crescita relativa dei compartimenti radici, rami e foglie rispetto a quella del fusto
	CAI (<i>Current Annual Increment</i>)	Stimato tramite il metodo di Borggreve (Hellrigl 1986) a livello di compres forestale è considerato costante per l'omogeneità fisionomica del bosco e per la brevità del periodo di simulazione (5 anni)	(4.6) 6.6 (7.2) (m ³ ha ⁻¹ anno ¹)
	Mortalità	Nulla	Per la brevità del periodo considerato
	Necromassa (a terra)	Mercurio & Spampinato 2006, Barreca et al. 2005, Scarfò et al. 2008a	3 (Mg C ha ⁻¹)
	Utilizzazioni	Piano di gestione (Contabile et al. 2008)	Parametrizzate tramite il piano dei tagli

triche. Dal CAI viene calcolato il tasso di crescita per il compartimento foglie, rami e radici utilizzando coefficienti di allocazione. In questo studio i coefficienti di allocazione sono considerati costanti per il periodo di simulazione. Il modello offre due possibilità per parametrizzare l'accrescimento di ogni singola coorte: 1) in funzione dell'età del popolamento (CAI, tavole alometriche); 2) in funzione della biomassa totale. Nel secondo caso l'accrescimento viene espresso come rapporto fra biomassa esistente e quella massima raggiungibile dall'ecosistema (utile per le foreste tropicali). In questo studio il CAI è considerato costante per il periodo di simulazione (Tab. 2).

La mortalità naturale (Mn_{it}), conteggiata dal modello come necromassa in piedi, può essere parametrizzata in funzione dell'età del popolamento o in funzione della biomassa totale per ogni singola coorte; la mortalità causata dalle operazioni forestali (Mu_{it}) viene parametrizzata come percentuale della biomassa che muore dopo le operazioni di utilizzazione. In questo studio la mortalità naturale è considerata nulla nel periodo di simulazione.

Il *turnover* (Tb_{it}) di ogni coorte è stimato come somma dei singoli *turnover* dei compartimenti foglie, rami e radici.

La biomassa asportata dalle utilizzazioni (U_{it}) viene parametrizzata come percentuale sottratta dalla biomassa totale nell'anno di riferimento nel periodo di simulazione. Questa può essere allocata nel modulo prodotti, inoltre, è possibile parametrizzare la quantità di residui di lavorazione che rimangono al suolo come percentuale sottratta dalla biomassa asportata.

Il SOC è stato valutato attraverso il modello YASSO incluso come modulo in CO2FIX (Masera et al. 2003, Liski et al. 2005). Il modello, costituito da 5 compartimenti di decomposizione e 2 compartimenti per il legno morto giacente a terra (*coarse woody debris* - Fig. 3), è stato parametrizzato per stimare il SOC fino alla profondità di 1 metro di suolo minerale. I dati di base del modello, che vengono considerati costanti per il periodo di simulazione, sono: (1) i tassi di *input* di C nel suolo (produzione di lettiera, legno morto, radici) e (2) dati termo-pluviometrici (da cui dipendono i tassi di decomposizione della lettiera e del legno morto stimati da YASSO). YASSO nasce per fornire dati di riferimento a carattere generale, in quanto le conoscenze su questo indicatore sono ancora scarse: nonostante ciò è stato testato in regioni tropicali, temperate e boreali con esito positivo (Masera et al. 2003, Gaboury et al. 2008).

Il modello CO2FIX stima i flussi di C annuali di en-

trata (*Atm loss*) e di uscita (*Atm inc*) dall'ecosistema a cadenza annuale come bilancio fra la produzione (biomassa prodotta, CAI) da una parte, e tassi di decomposizione del suolo (lettiera e legno morto giacente a terra, stimati dal modello YASSO) e dei prodotti (utilizzazioni) dall'altra. Per il C stoccato nei prodotti il modello fornisce 3 opzioni (Fig. 2): 1) può essere conteggiato per intero come rilasciato nell'atmosfera (questo studio); 2) viene calcolata la progressiva decomposizione dei prodotti durante il ciclo di vita e le conseguenti emissioni di CO₂ attraverso il modulo prodotti; 3) viene utilizzato il modulo della bioenergia che prende in considerazione le emissioni nell'atmosfera generate dallo sfruttamento dei prodotti come biomasse. La capacità di *sink* o di *source* dell'ecosistema viene calcolata attraverso i dati dei flussi annuali stimati dal modello per il periodo di simulazione come differenza fra le perdite dell'atmosfera ($Atm\ loss_t =$ carbonio sottratto all'atmosfera al tempo t) e gli incrementi nell'atmosfera ($Atm\ inc_t =$ carbonio immesso nell'atmosfera al tempo t - eqn. 4):

$$Sink_t = Atm\ loss_t - Atm\ inc_t$$

I valori di *Atm inc* e *Atm loss* rappresentano il bilancio netto di tutti i cambiamenti che avvengono a livello della biomassa, del suolo e dei prodotti mentre i dati dei singoli compartimenti (fusto, foglie, ecc.) forniti dal modello non tengono conto di tali cambiamenti. Ciò vuol dire che i valori di riferimento per applicare il metodo della differenza di *stock* di inventari successivi (Schlamadinger et al. 2007) sono quelli di *Atm inc* e *Atm loss* forniti da CO2FIX e non quelli dello *stock* dei compartimenti della fitomassa (fusto, foglie, ecc.; per ulteriori chiarimenti si rimanda a Schelhaas et al. 2004).

Il *sink* totale del periodo di simulazione è dato dalla sommatoria dei *sink* annuali ($sink_t$ - eqn. 5):

$$Sink_{tot} = \sum sink_t$$

Secondo l'IPCC (2003) nella valutazione del bilancio del C è necessario giustificare l'esclusione di *stocks* di carbonio in foresta. In questo studio sono state escluse dal conteggio tutte le piante con diametro a petto d'uomo inferiore a 2.5 cm, soglia minima di cavallettamento (Contabile et al. 2008).

L'attendibilità della stima di CO2FIX dipende soprattutto da due aspetti: 1) dalla natura stocastica dei coefficienti stimati dal modello; 2) dalla mancanza o dalla cattiva natura dei dati di *input* utilizzati per la stima del C (Schelhaas et al. 2004). Secondo Nabuurs & Mohren (1993) per ottenere risultati attendibili è necessario: a) utilizzare il modello a scala locale; b)

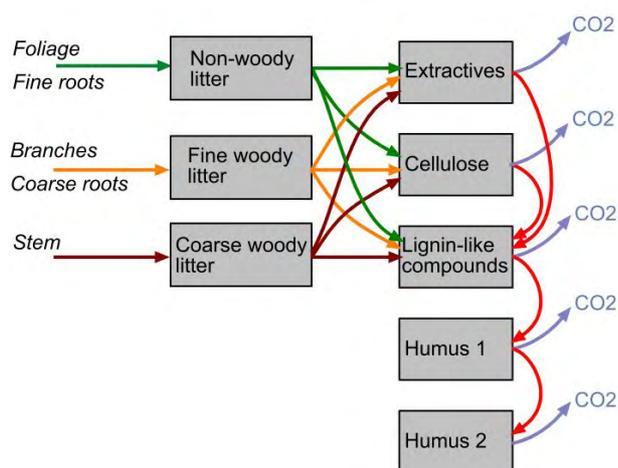


Fig. 3 - Diagramma di flusso del modello YASSO. I box rappresentano i compartimenti di C mentre le frecce rappresentano i flussi di C (Schelhaas et al. 2004).

utilizzare il modello per popolamenti omogenei sotto il profilo strutturale; c) utilizzare dati a valenza locale ed aggiornati. Secondo Nabuurs et al. (2008) i parametri di *input* che dimostrano di avere maggiore influenza sul sequestro di C calcolato tramite CO₂-FIX sono la densità basale del legno, il contenuto di C del legno ed il CAI. Queste considerazioni valgono soprattutto per il calcolo delle variazioni di *stock* della fitomassa.

Per ulteriori dettagli su CO₂FIX e YASSO è possibile consultare i lavori di Mohren et al. (1999), Nabuurs & Schelhaas (2002), Masera et al. (2003), Schelhaas et al. (2004) e Liski et al. (2005).

In questo studio il modello è stato testato a livello

di compresa forestale utilizzando i dati dendrometrici e delle utilizzazioni forniti nel piano dei tagli del Piano di Gestione Forestale (Contabile et al. 2008). Nel Box 2 viene riportata un breve rassegna dei modelli sviluppati con lo scopo di valutare quantitativamente e qualitativamente il C in foresta.

Dati e parametri di input del modello

I parametri di input per la stima del C nella fitomassa sono stati ottenuti attraverso l'analisi bibliografica ed analisi condotte direttamente in bosco (Tab. 2).

I parametri per il calcolo del C organico tramite il modello YASSO sono stati stimati attraverso: a) l'analisi delle serie storiche di 5 stazioni termo-pluviometriche prossime all'area studio (per il calcolo del tasso di decomposizione della lettiera); b) analisi bibliografica per calcolare i tassi di *input* di C nel suolo (Tab. 3).

Il calcolo dei crediti di CO₂ eq

Il 15 % del valore totale del *sink* (Mg C ha⁻¹) è stato moltiplicato per il fattore di conversione (44/12 per la CO₂) in modo da ottenere i crediti di CO₂ equivalenti (Mg CO₂ eq ha⁻¹ - eqn. 6):

$$\begin{aligned}
 1 \text{ Mg C ha}^{-1} &= 44/12 \text{ Mg CO}_2 \text{ eq ha}^{-1} \\
 &= 3.66 \text{ Mg CO}_2 \text{ eq ha}^{-1} \\
 &= 3.66 \text{ crediti di carbonio per ettaro}
 \end{aligned}$$

Risultati

Il sink generato dall'ecosistema ed i CO₂ eq

Il modello indica che il C fissato dall'ecosistema

Tab. 3 - Parametri di input del modello CO₂FIX per il calcolo del SOC.

Parametri del modello	Riferimento	Commenti
Totale delle precipitazioni durante la stagione vegetativa (Aprile-Ottobre)	Analisi delle serie storiche	-
Somma delle temperature dei giorni con T > 0 °C	Analisi delle serie storiche	-
Evapotraspirazione potenziale	(Schelhaas et al. 2004, Masera et al. 2003, Liski et al. 2005)	Il metodo per il calcolo della evapotraspirazione potenziale fa parte del modello YASSO.
Input di lettiera	Scarfò et al. 2008b	Tramite campionamento sistematico all'interno di aree si saggio è stata valutata la quantità e la qualità della lettiera in popolamenti di faggio dell'Appennino Calabrese paragonabili a quelli oggetto di questo studio.
Input radici	Masci et al. (1997)	-

Tab. 4 - Ripartizione del Ceco (Mg C ha⁻¹). Nota bene, il valore di *Atm loss* predetto da CO2FIX è costante nel periodo di simulazione (5.54): questo comportamento del modello è dovuto al valore costante del CAI utilizzato per il periodo di simulazione (Fig. 2). I valori di *Atm inc* e *Atm loss* rappresentano il bilancio netto di tutti i cambiamenti che avvengono a livello della biomassa, del suolo e dei prodotti mentre i dati dei singoli compartimenti (fusto, foglie, ecc.) forniti dal modello non tengono conto di tali cambiamenti. (*): legno morto.

Periodo di riferimento	Fusto	Foglie	Rami	Radici	Lettiera	SOC + LM*	Tot	Atm inc	Atm loss	Sink
2008	127.52	2.04	23.58	43.01	1.95	85.46	283.56	3.33	5.54	2.21
2009	129.54	2.12	24.27	43.48	1.92	83.98	285.31	3.05	5.54	2.49
2010	129.05	2.09	24.47	43.1	1.99	83.2	283.9	5.18	5.54	0.36
2011	131.06	2.13	25.15	43.56	2	82.64	286.54	2.94	5.54	2.60
2012	133.08	2.14	25.81	44.02	2.01	82.17	289.23	3.43	5.54	2.11
%	45.52	0.74	8.63	15.2	0.69	29.22	100	-	-	-
somma	-	-	-	-	-	-	-	17.93	27.70	9.77
media	130.05	2.10	24.66	43.43	1.97	83.49	285.71	3.59	5.54	1.95
DS	2.11	0.04	0.85	0.40	0.04	1.29	2.30	0.91	-	0.91

nel periodo 2008-2012 dalle attività di FM è pari a 9.77 Mg C ha⁻¹ (in media 1.95 ± 0.91 Mg C ha⁻¹ anno⁻¹ nel periodo di simulazione - Tab. 4).

La dinamica del *sink* viene riportata nella Fig. 4 per due scenari: con e senza utilizzazioni. Nello scenario senza utilizzazioni il valore medio del *sink* nel periodo di simulazione è di 2.37 (± 0.2) Mg C ha⁻¹ anno⁻¹.

Il totale crediti di carbonio generabili nel primo periodo d'impegno dalle attività di FM (art. 3.4 del PK) è di 5.36 Mg CO₂eq ha⁻¹ mentre la media annua per il primo periodo è di 1.07 (± 0.5) Mg CO₂eq ha⁻¹ anno⁻¹. I valori non scontati sono riportati in (Tab. 5).

Lo stock e il sink di C dell'ecosistema

La sommatoria dello *stock* dei 5 *pools* di C è detta anche C ecosistemico (*Ceco*). L'*output* del modello in-

dica che il *Ceco* varia durante il periodo di riferimento ed in media risulta essere pari a 285.71 (± 2.3) Mg C ha⁻¹ (Tab. 4). Il modello indica che il *pool* che contribuisce maggiormente allo *stock* di C è la biomassa epigea (fusto, rami e foglie: 54.89 %). Il solo compartimento del fusto contribuisce per il 45.52 % seguito da quello dei rami (8.63 %) e delle foglie (0.74 % - Tab. 4). Il *pool* suolo contribuisce per il 29.22 % (Tab. 4). La ripartizione del C nei vari *pools* viene riassunta nella Fig. 3.

Il SOC ottenuto dal modello per il periodo di simulazione è in media di 83.49 (± 1.29) Mg C ha⁻¹. La dinamica del SOC è diversa da quella del C nella biomassa. Nel periodo simulato esso mostra un *trend* decrescente mentre il C nella biomassa epigea tende ad aumentare (Fig. 6).

Tab. 5 - Valori del *sink* di C prodotto dall'ecosistema e della corrispondente quantità di crediti di carbonio potenzialmente generabili ai fini delle attività di FM per il periodo d'impegno del Protocollo di Kyoto.

Anno	Sink (Mg C ha ⁻¹ anno ⁻¹)	Crediti totali generati dall'ecosistema		Crediti utilizzabili ai fini del FM art. 3.4 del PK	
		Fattore di conversione (44/12)	CO ₂ eq (Mg CO ₂ eq ha ⁻¹ anno ⁻¹)	Riduzione al 15%	CO ₂ eq (Mg CO ₂ eq ha ⁻¹ anno ⁻¹)
2008	2.21	3.66	8.05	-85 %	1.21
2009	2.49	3.66	9.15	-85 %	1.37
2010	0.36	3.66	1.46	-85 %	0.20
2011	2.60	3.66	9.52	-85 %	1.43
2012	2.11	3.66	7.69	-85 %	1.16
media	1.95	-	7.17	-	1.07
DS	0.91	-	3.27	-	0.50
somma	9.77	-	35.87	-	5.36
			(Mg C ha ⁻¹ 2008-2012)	(Mg C ha ⁻¹ 2008-2012)	

Fig. 4 - Dinamica del sink di C dell'ecosistema nel Primo Periodo di Impegno (2008-2012).

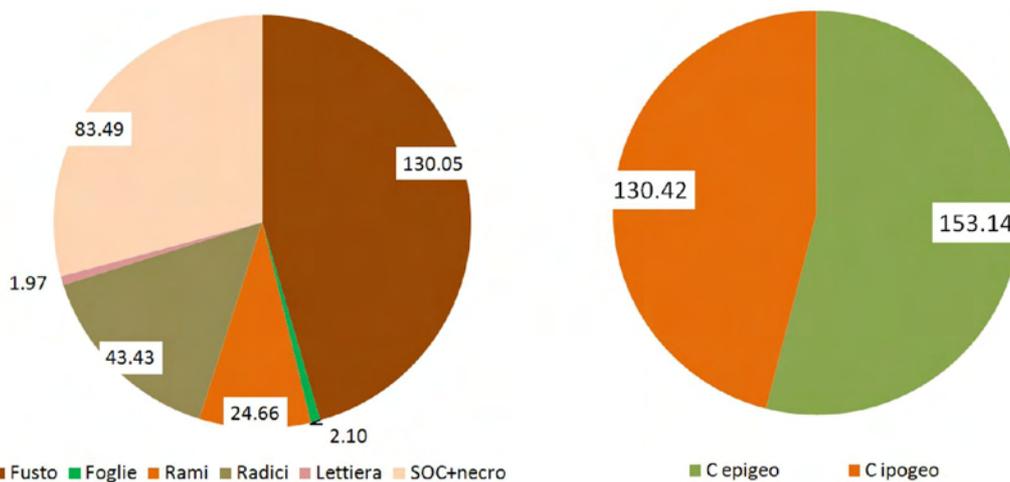
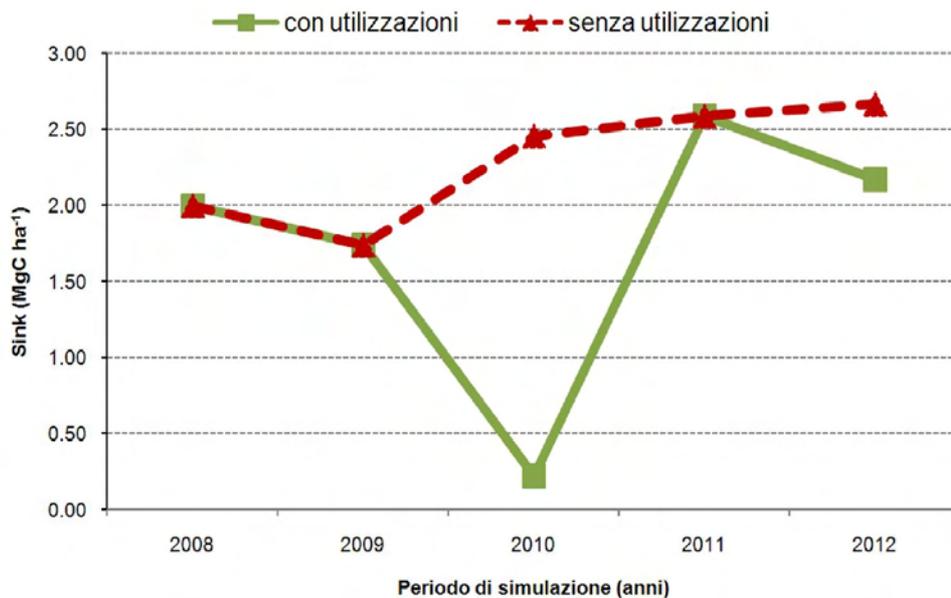


Fig. 5 - Ripartizione del C nei pools dell'ecosistema nel periodo di simulazione (media Mg C ha⁻¹).

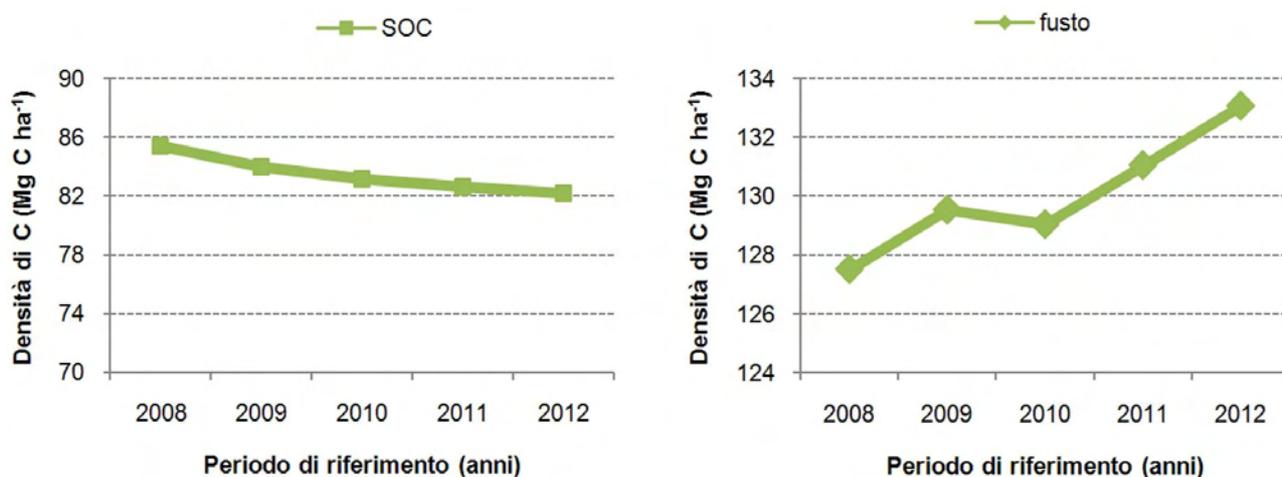


Fig. 6 - Dinamica dello stock di C nel suolo (SOC) e nel fusto per il periodo di simulazione.

Box 1 - Stima della superficie necessaria per assorbire le emissioni di CO₂ di un'automobile

Il calcolo è stato svolto ipotizzando una percorrenza media di 20.000 Km l'anno per due differenti tipi di automobile: 1) utilitaria; fattore di emissione pari a 125 g CO₂ km⁻¹; 2) fuoristrada; fattore di emissione pari 190 g CO₂ km⁻¹. In entrambi i casi il calcolo è basato sul valore medio ad ettaro di CO₂eq ricavabile da attività di FM (ovvero il *sink* scontato dell'85%) poste in essere sulla superficie forestale oggetto dello studio. La superficie di bosco necessario per assorbire le emissioni di un'utilitaria è risultata in media uguale a 3.19 (± 2.94) ha mentre per un fuoristrada il valore sale a 4.85 (± 4.47) ha.

Confronto fra volume atteso e volume osservato nell'anno di inizio simulazione

La massa dendrometrica attesa calcolata dal modello per la compresa boschi di faggio per il primo anno di simulazione (2008) è di 495.4 m³ ha⁻¹ mentre quella osservata per lo stesso anno è di 491.1 m³ ha⁻¹ (Contabile et al. 2008).

Discussione

I dati stimati dal modello CO2FIX indicano che nel periodo di simulazione la compresa forestale si comporta come *sink* in maniera differenziata nel tempo. L'effetto principale di tale variazione è da attribuire alle utilizzazioni programmate per l'anno 2010 (*sink*

= 0.36 Mg C ha⁻¹ - Tab. 4, Fig. 4) in quanto il C asportato viene considerato come rilasciato nell'atmosfera. Queste osservazioni mettono in evidenza come la gestione forestale ed in particolare la selvicoltura influiscano sulla capacità di fissazione del C degli ecosistemi forestali. Il valore di assorbimento medio ottenuto dal modello, di 1.95 (± 0.91) Mg C ha⁻¹ anno⁻¹ nel periodo di simulazione, differisce di poco da quello riportato da Pregitzer & Euskirchen (2004) di 1.7 (± 3.2) Mg C ha⁻¹ anno⁻¹ per le foreste temperate. Nabuurs & Schelhaas (2002) hanno valutato il *sink* in 16 tipi forestali Europei dislocati in 10 Stati (Italia compresa, rappresentata dalle faggete dell'Appennino centrale, CAI = 7 m³ ha⁻¹ anno⁻¹) attraverso il software CO2FIX ottenendo un valore medio di culminazione della capacità di assorbimento di (1.15) 2.98 (4.1) Mg C ha⁻¹ anno⁻¹, che per la maggior parte delle tipologie si verifica dopo il 38esimo anno mentre i valori scendono a (0.13) 0.8 (1.4) Mg C ha⁻¹ anno⁻¹ dopo il 200esimo anno. A causa dell'alta variabilità dei dati, i valori forniti da Nabuurs e Schelhaas sono da considerare indicativi; inoltre gli autori non riportano i valori per singola tipologia. Mund (2004) riporta per una faggeta trattata a tagli successivi in Germania valori di 4.6 Mg C ha⁻¹ anno⁻¹. Tonolli & Salvagni (2007) riportano valori di 1.84 Mg C ha⁻¹ anno⁻¹ per una faggeta di 45 anni in provincia di Vicenza. Pilli et al. (2008) riportano per una fustaia transitoria di faggio in provincia di Vicenza valori di 2.36 Mg C ha⁻¹ anno⁻¹ (questo valore è vicino a quello predetto dal modello in questo studio per il periodo di simulazione di 2.37 Mg C ha⁻¹ anno⁻¹ nello scena-

Tab. 6 - Valori medi di *sink* (Mg C ha⁻¹ anno⁻¹) riportati da vari autori ed in questo studio. (I): media delle 16 stime fino al 38esimo anno di età. (II): media delle 16 stime dopo il 200esimo anno di età. (*): valore medio calcolato per il periodo di simulazione ± DS; (**): valore medio calcolato nel periodo di simulazione ± DS per lo scenario senza utilizzazioni.

Sink	Riferimento	Commenti	Località
(1.15) 2.98 (4.1) ^I (0.13) 0.8 (1.4) ^{II}	Nabuurs & Schelhaas (2002)	Valori stimati attraverso il modello CO2FIX v. 3.1	16 stati dell'Europa tra cui l'Italia.
4.6	Mund (2004)	metodo della variazione dello stock (<i>stock change method</i> - Nabuurs et al. 2003)	Germania centrale
1.7 (±3.2)	Pregitzer & Euskirchen (2004)	Valore medio ottenuto da studi vari.	Foreste temperate
1.84	Tonolli & Salvagni (2007)	Metodo della variazione dello stock (<i>stock change method</i> - Nabuurs et al. 2003)	Provincia di Trento (ITA)
2.36	Pilli et al. (2008)	Relazioni allometriche e metodo della variazione dello stock (<i>stock change method</i> - Nabuurs et al. 2003)	Provincia di Vicenza (ITA)
1.95 (±0.91)* 2.37 (±0.2)**	questo studio	Valori stimati attraverso il modello CO2FIX v. 3.1	Appennino Calabrese (ITA)

Tab. 7 - Valori di biomassa epigea (media Mg C ha⁻¹) riportati da vari autori e in questo studio. * altezza dominante.

Età (anni)	Densità (p ha ⁻¹)	Altezza (m)	Biomassa epigea (Mg C ha ⁻¹)	Riferimento	Località
60	3590	10.3	147	Visonà et al. (1975)	Monte Terminillo (ITA)
90-115	398	23.1	319.5	Calamini et al. (1983)	Appennino Pistoiese (ITA)
105	885	18	208.17	Masci et al. (1997)	Appennino Abruzzese (ITA)
-	-	-	120	Joosten et al. (2004)	Germania occidentale
85-102	511	24.5	167.11	Mund (2004)	Germania centrale
-	-	-	57.41	Tonolli & Salvagni (2007)	Provincia di Trento (ITA)
45	-	13*	89	Pilli et al. (2008)	-
80-120	661	22.1	156.81	questo studio	Appennino Calabrese (ITA)

rio senza utilizzazioni - Tab. 6).

Il *Ceco* ottenuto dal modello di 285.71 (± 2.3) Mg C ha⁻¹, nel periodo di simulazione, risulta maggiore rispetto ai valori riportati da Tonolli & Salvagni (2007) di 176.2 (± 43.91) Mg C ha⁻¹ (per le faggete della Provincia di Trento), da Prentice (2001) di 218 Mg C ha⁻¹, da Pregitzer & Euskirchen (2004) di 239 (± 101) Mg C ha⁻¹ e da Mund (2004) di 255.28 Mg C ha⁻¹. Pregitzer & Euskirchen (2004) riportano che la variabilità di questo indicatore aumenta nei popolamenti di età avanzata (*old growth forests*).

Il valore medio del C della biomassa epigea ottenuto dal modello del periodo di simulazione di 156.8 (± 2.99) Mg C ha⁻¹ risulta: a) maggiore rispetto ai valori riportati da Pilli et al. (2008), Visonà et al. (1975), Joosten et al. (2004) e Tonolli & Salvagni (2007); b) minore rispetto ai valori riportati da Calamini et al. (1983), Masci et al. (1997) e Mund (2004 - Tab. 7). Dalla Tab. 7 si evince inoltre come i valori delle faggete di età comparabile (Masci et al. 1997, Mund 2004) sono molto simili. Il C nella biomassa epigea tende ad aumentare nel periodo di simulazione (Tab.

4) e ciò indica che le utilizzazioni previste non superano il saggio naturale di accrescimento. In un'ottica di lungo periodo questo tipo di gestione tende a far incrementare lo *stock* di C nella fitomassa.

Il valore medio del SOC nel periodo di simulazione ottenuto dal modello di 83.49 (± 1.29) Mg C ha⁻¹ è in linea con i valori riportati da Mund (2004), Pregitzer & Euskirchen (2004), Tonolli & Salvagni (2007), mentre risulta minore ai valori riportati da Eswaran et al. (2000) e Prentice (2001 - Tab. 8). La Fig. 6 e la Tab. 4 mettono in evidenza una diminuzione dello *stock* di C del suolo. Fermo restando che, in generale, i valori di questo indicatore, nonché di quelli forniti da CO2FIX, sono da considerare di larga massima e i dati di *input* del modello YASSO sono costanti nel periodo di simulazione, il *trend* negativo può essere attribuito a due aspetti che meritano ulteriori approfondimenti: 1) al regime di utilizzazioni; infatti, su questo aspetto vi sono studi (Covington 1981, Knoepp & Swank 1997, Law et al. 2001) che dimostrano come il SOC diminuisce in conseguenza ad interventi selvicolturali; 2) alla risposta lenta del mo-

Tab. 8 - Valori di SOC (media ± DS Mg C ha⁻¹) riportati da vari autori e in questo studio. (*): valore medio calcolato per il periodo di simulazione.

SOC	Riferimento	Commenti	Località
96	Eswaran et al. (2000)	Valori ottenuti da studi vari	Foreste temperate
151	Prentice (2001)	Valore ottenuti da studi vari	Foreste temperate
88.17 (±9.3)	Mund (2004)	Valori stimati attraverso campionamento sistematico all'interno di aree di saggio	Germania centrale
82.3 (±39.5)	Pregitzer & Euskirchen (2004)	Valore ottenuti da studi vari	Foreste temperate
88.64 (±22.24)	Tonolli & Salvagni (2007)	Valori stimati attraverso campionamento sistematico all'interno di aree di saggio	Provincia di Trento (ITA)
83.49 (±1.29)*	questo studio	Valori stimati attraverso il modello YASSO	Appennino Calabrese (ITA)

Box 2 - Modelli per la quantificazione della fissazione di CO₂ negli ecosistemi forestali			
Modello	Riferimenti	Commenti	Applicazioni
LANDIS II	He et al. 1999, Mladenoff 2004, http://www.landis-ii.org/	Scala di paesaggio	Foreste tropicali e temperate
PROGNAUS	Thomas 2004, http://www.waldwissen.net/themen/inventur_monitoring/prognosemodelle/bfw_Prognaus_EN	Albero individuale	Foreste tropicali
GOTILWA+	Sabaté et al. 2004, Gracia et al. 2005, http://www.crea.uab.es/gotilwa+/Index.htm	Processi fisiologici della crescita del singolo individuo	Australia, USA
GORCAM	Marland & Schlamadinger 1995, Schlamadinger & Marland 1996, http://www.joanneum.at/gorcam.htm	Flussi di carbonio a scala di popolamento	Canada
FullCAM 3.0	Richards et al. 2005, http://www.climatechange.gov.au/ncas/activities/modelling.html	Il modello è composto da più sottomodelli	Australia
3PG	Landsberg & Waring 1997, http://www.fsl.orst.edu/mycology/ss/3PG.htm	Processi fisiologici della crescita	Australia, Nuova Zelanda, Oregon
TreeGrOSS	Nagel 1996, Schmidt et al. 2006, http://www.nw-fva.de/~nagel/treegrOSS/	-	Germania
BWIN Pro-S	http://www.forst.tu-dresden.de/Waldwachstum/simulator_ww_e.htm	Albero individuale	Germania
SPECIES	Pearson et al. 2002	-	USA
CenW 3.1	http://www.kirschbaum.id.au/Welcome_Page.htm	-	Australia
CO2Fix 3.1	Masera et al. 2003, Schelhaas et al. 2004, vedi testo	Scala eco sistemica si serve del sottomodulo YASSO per il suolo	America del sud, nord e centro Europa

dello YASSO per raggiungere un *equilibrium*; in questo caso avendo a disposizione dati storici si sarebbe potuto inizializzare il modello partendo da un periodo precedente a quello di simulazione. Nonostante ciò, come già riportato, i valori medi forniti dal modello sono in linea con altri studi analoghi.

Il rapporto fra il C contenuto nella biomassa epigea e SOC (C biomassa epigea/SOC) in questo studio è uguale a 2.16; secondo i dati ottenuti da Mund (2004) è di 1.9, mentre secondo i dati di Tonolli & Salvagni (2007) è di 0.65. Ciò indica una grande variabilità del parametro.

Conclusioni

Il modello CO2FIX si è dimostrato uno strumento valido per la stima del *sink* di carbonio di un popolamento forestale e dei relativi crediti generabili dalle attività di FM. La flessibilità di questo strumento si traduce: a) nella relativa facilità di reperire i dati di

input sia per il modulo della biomassa che del suolo; b) nella possibilità di parametrizzare con precisione le attività di utilizzazione; c) nella possibilità di inizializzare il modello senza la necessità di disporre di dati storici (purché vi sia corrispondenza fra i dati osservati e quelli forniti dal modello). Gli accorgimenti necessari per l'uso del modello sono quelli di utilizzare dati sito-specifici ed aggiornati. La stima deve essere considerata a valenza locale considerando che il contenuto di C negli ecosistemi forestali è molto variabile. Il valore di *sink* fornito dal modello CO2FIX è dello stesso ordine di grandezza di altri lavori presenti in letteratura e dimostra che la compressa contribuisce positivamente (ma in maniera differenziata nel periodo di simulazione) alle attività di FM nel primo periodo d'impegno. I dati mettono in evidenza che, per il popolamento oggetto di questo studio, per mantenere positiva la fissazione di C dell'ecosistema forestale non si deve utilizzare una mas-

sa superiore a quella generata del saggio naturale di accrescimento. Nel caso di FM sarebbe opportuno poter conteggiare il carbonio fissato nei prodotti legnosi, in questo modo la quantità di C fissato aumenterebbe. Per fare questo sono necessari studi sui cicli di vita dei prodotti legnosi e strumenti attuativi quali la certificazione forestale (gestione forestale sostenibile e di filiera). In questo caso per i proprietari forestali, oltre al costo del Piano di Gestione Forestale, si deve sommare quello della certificazione che potrebbe essere ammortizzato nel lungo periodo, visti i valori effettivamente quantificabili ai fini dell'FM, dalla vendita di crediti di C. In questo senso la possibilità di sfruttare la capacità di assorbimento di C degli ecosistemi forestali, da parte di privati e delle amministrazioni, diventa un investimento di lungo periodo che potrebbe avere dei risvolti positivi o negativi a seconda delle decisioni politiche e delle tendenze del mercato. Dal 1 gennaio 2008 è partita la contabilizzazione degli assorbimenti di carbonio con l'istituzione del Registro dei Serbatoi di Carbonio Agro-Forestali. Viste le prospettive future, in questa fase è opportuno indirizzare le azioni di ricerca verso la sperimentazione di sistemi selvicolturali e forme di trattamento che consentono la massimizzazione della capacità di fissazione di C dei popolamenti forestali mentre, per i proprietari e le amministrazioni, è opportuno prepararsi ad un'eventuale entrata "in gioco", munendosi degli strumenti di pianificazione e di certificazione disponibili. In questo senso l'accorpamento delle proprietà in strumenti di gestione quali il consorzio forestale consente di contenere i costi. Come per tutte le attività imprenditoriali, c'è un margine di rischio da tenere in considerazione.

Per quanto riguarda il *pool* suolo esso è stato scarsamente considerato nel passato, in quanto privo di interesse economico, e perciò la carenza di dati e conoscenze è maggiore rispetto alla fitomassa. Le attuali azioni di mitigazione dei cambiamenti climatici hanno rivalutato il suolo come *sink* e *stock* di C e per questo motivo è necessario approfondire le conoscenze a riguardo.

Per quanto riguarda l'applicazione di modelli per la simulazione delle quantità di carbonio residente e dei flussi tra i vari serbatoi di carbonio, si noti che nel caso di piantagioni come ad esempio quelle all'interno delle attività denominate AR-CDM (*Afforestation/Reforestation-Clean Development Mechanism*) le stime ottenute dai modelli sono meno affette da errore.

Ringraziamenti

Grazie a due anonimi revisori per i loro commenti utili alla stesura di questo manoscritto ed al Dr. Palosuo Taru per le informazioni fornite sul modello YASSO.

Bibliografia

- Alder D, Silva JNM (2000). An empirical cohort model for management of *Terra Firma* forest in the Brazilian Amazon. *Forest Ecology and Management* 130: 141-157. - doi: 10.1016/S0378-1127(99)00196-6
- Barreca L, Gugliotta OI, Mercurio R (2005). Stime quantitative della necromassa in cedui di faggio nel Parco Nazionale dell'Aspromonte e nel Parco dell'Etna. *Linea Ecologica* 1: 40-45.
- Bravo F (2007). IPCC - El papel de los bosques españoles en la mitigación del cambio climático (1ª Edición 2007). Fundación Gas Natural Plaça del Gas, Barcelona, España. [online] URL: <http://www.fundaciongasnatural.org>.
- Calamini G, Gregori E, Hermanin L, Lopresti R, Monlacu M (1983). Studio di una faggetta nell'Appennino pistoiese: biomassa e produzione primaria netta epigea. *Ann. Ist. Sperim. Studio e Dif. del Suolo* 14:193-214.
- Covington WW (1981). Changes in forest floor organic matter and nutrient content following clear cutting in northern hardwoods. *Ecology* 62: 41-48. - doi: 10.2307/1936666
- EEA (2006). European forest types. Technical Report n. 9. [online] URL: http://eea_technical_report_9_2006.pdf
- EU Commission (1991). CORINE biotopes manual-habitats of the European community. A method to identify and describe consistently sites of major importance for nature conservation. Data specifications. Luxembourg, vol. 3, pp. 300.
- EU Commission (1999). Natura 2000. Interpretation manual of European union habitats.
- Eswaran H, Reich PF, Kimble JM, Beinroth FH, Padamnanhan E, Moncharoen P (2000). Global carbon stock. In: "Global climate change and pedogenic carbonates" (Lal R, Kimble JM, Eswaran H Stewart BA eds). CRC/Lewis Publisher, Boca Raton, FL, pp. 15-25.
- Gaboury S, Boucher JF, Villeneuve C, Lord D, Gagnon R (2008). Estimating the net carbon balance of boreal open woodland afforestation: a case-study in Québec's closed-crown boreal forest. *Forest Ecology and Management* 257: 483-494. - doi: 10.1016/j.foreco.2008.09.037
- Giordano G (1983). Tecnologia del legno (3° edn). UTET, Torino, vol. 2.
- Grace J (2004). Understanding and managing the global carbon cycle. *Journal of Ecology* 92(2): 189-202. - doi: 10.1111/j.0022-0477.2004.00874.x
- Gracia C, Pla E, Sánchez A, Sabaté S (2005). GOTILWA+

- un modelo de crecimiento forestal basado en procesos ecofisiológicos. Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales 18: 21-28.
- He HS, Mladenoff DJ, Boeder J (1999). An object-oriented forest landscape model and its representation of tree species. *Ecological Modelling* 119: 1-19. - doi: 10.1016/S0304-3800(99)00041-1
- Hellrigl B (1986). Il rilievo dendro-crono-auxometrico. In: "Nuove metodologie nella elaborazione dei piani di assestamento dei boschi" (Bagnaresi U, et al. eds). ISEA, Bologna, pp. 1121.
- Houghton RA (2003). Why are estimates of the terrestrial carbon balance so different? *Global Change Biology* 9 (4): 500-509.
- IPCC (2001). *Climate change 2001: the scientific basis*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 881.
- IPCC (2003). *Good practice guidance for land use, land-use change and forestry* (Penman J, Gytarsky M, Hiraishi T, Krug T, Kruger D, Pipatti R, Buendia L, Miwa K, Ngara T, Tanabe K, Wagner F eds). Institute for Global Environmental Strategies (IGES), Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- IPCC (2007). *Climate change 2007: the scientific basis*. IPCC 4th assessment report, Working group I. [online] URL: <http://www.ipcc.ch>.
- Joosten R, Schumacher J, Wirth C, Schulte A (2004). Evaluating tree carbon predictions for beech (*Fagus sylvatica* L.) in western Germany. *Forest Ecology and Management* 189 (1-3): 87-96. - doi: 10.1016/j.foreco.2003.07.037
- Knoepp JD, Swank WT (1997). Forest management effects on surface soil carbon and nitrogen. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 928-935.
- Landsberg JJ, Waring RH (1997). A generalized model of forest productivity using simplified concepts of radiation use efficiency, carbon balance and partitioning. *Forest Ecology and Management* 95: 209-228. - doi: 10.1016/S0378-1127(97)00026-1
- Law BE, Thornton PE, Irvine J, Anthoni PM, van Tuyl FS (2001). Carbon storage and fluxes in ponderosa pine forests at different development stages. *Global Change Biology* 7: 755-777. - doi: 10.1046/j.1354-1013.2001.00439.x
- Liski J, Palosuo T, Sievänen R (2005). Carbon and decomposition model Yasso for forest soils. *Ecological Modelling* 189: 168-182. - doi: 10.1016/j.ecolmodel.2005.03.005
- Marland G, Schlamadinger B (1995). Biomass fuels and forest management strategies: How do we calculate the greenhouse-gas emissions benefits? *Energy* 20: 1131-1140.
- Masci A, Napoli S, Matteucci G, Scarascia Mugnozza G (1997). Produzione di biomassa ipogea e radicale in una faggeta e in un rimboschimento di abete rosso. *SISEF Atti* 1: 225-232.
- Masera OR, Garza-Caligaris J, Kanninen M, Karjalainen T, Liski J, Nabuurs GJ, Pussinen A, de Jong BHJ, Mohren, GMJ (2003). Modelling carbon sequestration in afforestation, agroforestry and forest management projects: the CO2FIX V.2 approach. *Ecological Modelling* 164: 177-199. - doi: 10.1016/S0304-3800(02)00419-2
- Mercurio R, Spampinato G (2006). I tipi forestali delle Serre calabresi. Laruffa Editore, Reggio Calabria, pp. 218.
- Mladenoff DJ (2004). Landis and forest landscape models. *Ecological Modelling* 180: 7-19. - doi: 10.1016/j.ecolmodel.2004.03.016
- Mohren GMJ, Garza Caligaris JF, Masera O, Kanninen M, Karjalainen T, Pussinen A, Nabuurs GJ (1999). CO2FIX for windows: a dynamic model of the CO₂-fixation in forests - Version 1.2. IBN Research Report 99/3, pp. 33.
- Mund M (2004). Carbon pools of European beech forests (*Fagus sylvatica*) under different silvicultural management. PhD Thesis, Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme Reihe A, Band 189, pp. 256. [online] URL: http://www.bgc.mpg.de/bgc-processes/staff/martina.-mund/Mund_Dissertation_2004.pdf
- Nabuurs GJ, Mohren GMJ (1993). Carbon in Dutch forest ecosystems. *Neth. J. Agr. Sci.* 41: 309-326.
- Nabuurs GJ, Ravindranath NH, Paustian K, Freibauer A, Hohenstein W, Makundi W (2003). LUCF sector good practice guidance. Chapter 3: 3.1-3.272. In: "Good practice guidance for land use, land use change and forestry" (Penman J, Gytarsky M, Hiraishi T, Krug T, Kruger D, Pipatti R, Buendia L, Miwa K, Ngara T, Tanabe K, Wagner F eds). The Institute for Global Environmental Strategies for the Intergovernmental Panel on Climate Change, Hayama, Kanagawa, Japan.
- Nabuurs GJ, Schelhaas MJ (2002). Carbon profiles of forest types across Europe assessed with CO₂FIX. *Ecological Indicators* 1: 213-223. - doi: 10.1016/S1470-160X(02)00007-9
- Nabuurs GJ, van Putten B, Knippers TS, Mohren GMJ (2008). Comparison of uncertainties in carbon sequestration estimates for a tropical and a temperate forest. *Forest Ecology and Management* 256 (3): 237-245. - doi: 10.1016/j.foreco.2008.04.010
- Nagel J (1996). Anwendungsprogramm zur Bestandsbewertung und zur Prognose der Bestandesentwicklung. *Forst u. Holz* 51 (3): 76-78.
- Contabile G, Lavecchia M, Modica G (2008). Piano di gestione forestale. Piano di assestamento 2008-2017. Comune di San Vito sullo Ionio (CZ).
- Pearson RG, Dawson TP, Berry PM, Harrison PA (2002). SPECIES: a spatial evaluation of climate impact on the envelope of species. *Ecological Modelling* 154 (3): 289-300. - doi: 10.1016/S0304-3800(02)00056-X
- Pilli R, Anfodillo T, Carrer M (2006). Towards a functional and simplified allometry for estimating forest biomass. *Forest Ecology and Management* 237 (1-3): 583-593. - doi:

- 10.1016/j.foreco.2006.10.004
- Pilli R, Dalla Valle E, Anfodillo T, Penzo D, Fontanella F (2008). Fissazione di carbonio in una fustaia transitoria di faggio sottoposta a tagli culturali. *Forest@* 5: 57-67. - doi: 10.3832/efor0510-0050057
- Pregitzer KS, Euskirchen ES (2004). Carbon cycling and storage in world forests: biome patterns related to forest age. *Global Change Biology* 10: 2052-2077. - doi: 10.1111/j.1365-2486.2004.00866.x
- Prentice IC (2001). The carbon cycle and atmospheric carbon dioxide. In: "Climate change 2001: the scientific basis". IPCC, Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 183-237.
- Reed KL (1980). An ecological approach to modeling the growth of forest trees. *Forest Science* 26: 33-50.
- Richards G, Evans D, Reddin A, Leitch J (2005). The full-CAM carbon accounting model (Version 3.0) User Manual.
- Rivas Martinez S (1993). Bases para una nueva clasificación bioclimática de la Tierra. *Folia Bot. Matritensis* 10: 1-23.
- Sabaté S, Gracia C, Pla E, Sánchez A, Vayreda J (2004). Aplicación del modelo GOTILWA+ para el análisis de los efectos del Cambio Climático y la Gestión Forestal en el balance de carbono y agua en los bosques. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales* 18:13-20.
- Scarfò F, Mercurio R, Bagnato S (2008a). I tipi forestali della Riserva Naturale Orientata Valle del Fiume Argentino (Orsomarso, CS). *Forest@* 5: 233-252. - doi: 10.3832/efor0536-0050233
- Scarfò F, Mercurio R, Barreca L (2008b). Dead wood in beech forests (*Fagus sylvatica* L.) in southern Apennine (Italy). In press.
- Schelhaas MJ, van Esch PW, Groen TA, de Jong BHJ, Kanninen M, Liski J, Masera O, Mohren GMJ, Nabuurs GJ, Palosuo T, Pedroni L, Vallejo A, Vilen T (2004). CO2FIX V. 3.1 - description of a model for quantifying carbon sequestration in forest ecosystems and wood products. AL-TERRA Report 1068, Wageningen, The Netherlands.
- Schlamadinger B, Bird N, Johns T, Brown S, Canadell J, Ciccacese L, Dutschke M, Fiedler J, Fischlin A, Fearnside P, Forner C, Freibauer A, Frumhoff P, Hoehne N, Kirschbaum MUF, Labat A, Marland G, Michaelowa A, Montanarella L, Moutinho P, Murdiyarso D, Pena N, Pingoud K, Rakonczay Z, Rametsteiner E, Rock J, Sanz MJ, Schneider UA, Shvidenko A, Skutsch M, Smith P, Somogyi Z, Trines E, Ward M, Yamagata Y (2007). A synopsis of land use, land-use change and forestry (LULUCF) under the Kyoto Protocol and Marrakech Accords. *Environmental Science & Policy* 10: 271-282. - doi: 10.1016/j.envsci.2006.11.002
- Schlamadinger B, Marland G (1996). Carbon implications of forest management strategies. In: "Forest ecosystems, forest management and the global carbon cycle" (Apps MJ, Price DT eds). NATO ASI Series, vol. I 40: 217-232.
- Schmidt M, Böckmann Th, Nagel J (2006). The use of tree models for silvicultural decision making. In: "Sustainable forest management, growth models for Europe" (Hase-nauer H ed). Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 237-261.
- Thomas L (2004). PROGNAUS - ein Waldwachstumsmodell zur Fortschreibung von Inventurdaten.
- Tonolli S, Salvagni F (2007). InFoCarb: inventario forestale del carbonio della provincia di Trento. Centro di Ecologia Alpina, Trento, pp. 176.
- UNFCCC (2005). Decisione 16/CPM.1 (Land use, land use change and forestry). [online] URL: <http://unfccc.int/2680.php>
- UNFCCC (2006). Decisione 8/CMP.2 (Forest management under Article 3, paragraph 4, of the Kyoto Protocol: Italy). [online] URL: <http://unfccc.int/2860.php>
- USDA (1999). Soil survey staff: soil taxonomy (2nd edn). Agricultural handbook n. 436. USDA-NRCS.
- Vanclay JK (1989). A growth model for North Queensland rainforest. *Forest Ecology and Management* 27: 245-271. - doi: 10.1016/0378-1127(89)90110-2
- Visonà L, Naviglio L, Simoneto L, Azzolini I, Giovannardi R (1975). Researches on beech forest: structure and biomass of the beechwood in the Mount Terminillo I.B.P. station. *Annali di Botanica* 34: 143-170.