

## Modellistica del ciclo del carbonio degli ecosistemi agro-forestali in regione Lombardia

Colombo R\* <sup>(1)</sup>, Busetto L <sup>(1-2)</sup>, Migliavacca M <sup>(1)</sup>, Meroni M <sup>(1)</sup>, Della Torre C <sup>(3)</sup>, Tagliaferri A <sup>(3)</sup>, Grassi G <sup>(4)</sup>, Seufert G <sup>(4)</sup>

(1) Lab. Telerilevamento delle Dinamiche Ambientali, DISAT, Università Milano-Bicocca, Milano; (2) Istituto sull'Inquinamento Atmosferico CNR, Roma; (3) Ente Regionale per i Servizi all'Agricoltura e alle Foreste Lombardia, v. Copernico 38, I-20125 Milano; (4) European Commission - DG Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability - Climate Change Unit (Ispra, VA). - \*Corresponding Author: Roberto Colombo (roberto.colombo@unimib.it).

**Abstract:** Modelling carbon cycle of agro-forest ecosystems in Lombardy (Italy). In this paper we present a methodology for the estimation of Gross Primary Production (GPP), Net Primary Production (NPP) and Net Ecosystem Production (NEP) for the main agricultural and forest ecosystems of Lombardy (Italy). The MOD17 model was parameterized according to the different agro-forestry ecosystems and applied at regional scale by using satellite data with a spatial resolution of 250m. The high spatial resolution along with fine classification agro-forestry ecosystems has allowed to accurately analyze the carbon budget of an extremely fragmented and complex environment such as the Lombardy region. Modeling results showed the role of the forests in the carbon budget at regional scale and represent important information layer for the spatial analysis and for inferring the inter-annual variability of carbon sequestration due to impacts of extreme events and recent climate change (e.g., drought, heat wave, flooding, fires).

**Keywords:** Telerilevamento satellitare, Produttività primaria, Modello MOD17, Ecosistemi agro-forestali, Regione Lombardia

Received: Jun 15, 2009; Accepted: Jun 19, 2009

**Citation:** Colombo R, Busetto L, Migliavacca M, Meroni M, Della Torre C, Tagliaferri A, Grassi G, Seufert G, 2009. Modellistica del ciclo del carbonio degli ecosistemi agro-forestali in regione Lombardia. Forest@ 6: 277-288 [online: 2009-09-18] URL: <http://www.sisef.it/forest@/>.

### Introduzione

Negli ultimi decenni la comunità scientifica internazionale ha focalizzato l'attenzione sull'analisi del ciclo biogeochimico del carbonio degli ecosistemi forestali a causa della loro capacità di sequestrare una parte del carbonio di origine antropica emesso in atmosfera (Watson et al. 2000). Tali ecosistemi rivestono infatti un significativo ruolo potenziale per il sequestro di CO<sub>2</sub> dall'atmosfera e per lo stoccaggio a lungo termine del carbonio. Come recentemente evidenziato dal rapporto IPCC (Denman et al. 2007), il tasso di sequestro di carbonio annuo degli ecosistemi terrestri a livello globale (denominato *Land Carbon Sink*) è stimato in circa 1.6 GtC. Il *Land Carbon Sink* è il risultato del bilancio tra assorbimento di carbonio

in seguito al processo di fotosintesi (*Gross Primary Production*, GPP) ed emissione di carbonio dovuta a differenti fattori tra i quali la respirazione autotrofa (R<sub>A</sub>), la respirazione eterotrofa (R<sub>H</sub>), l'entità delle utilizzazioni e dei disturbi (F<sub>dist</sub>, dovuta per esempio a tagli, incendi) ed infine le emissioni dei composti non CO<sub>2</sub> (ad es., metano, composti organici volatili e composti organici disciolti). Seguendo quanto suggerito da Chapin et al. (2006), per i soli flussi di CO<sub>2</sub> il bilancio del carbonio di un ecosistema (*Net Biome Production* - NBP, tC ha<sup>-1</sup> anno<sup>-1</sup>) può essere descritto con la seguente equazione (eqn. 1):

$$NBP = GPP - R_A - R_H - F_{dist}$$

dove NPP (*Net Primary Production*) rappresenta la

produttività primaria netta e NEP (*Net Ecosystem Production*) rappresenta la produttività netta di ecosistema (ovvero la fotosintesi al netto dei processi di respirazione autotrofa ed eterotrofa).

La produttività degli ecosistemi terrestri, sia NPP che NEP, e la sua variabilità interannuale sono strettamente legate a fattori climatico-ambientali. Per questa ragione lo sviluppo di metodologie e tecniche per il monitoraggio e la modellistica a scala regionale e continentale del bilancio del carbonio delle diverse coperture agricole e forestali è di primaria importanza non solo ai fini di un'appropriatezza comprensione del comportamento degli ecosistemi terrestri in termini di emissione e assorbimento di CO<sub>2</sub>, ma anche per la valutazione dell'impatto dei cambiamenti climatici globali e di eventi estremi (siccità, ondate di calore, alluvioni) sui processi che regolano i flussi di carbonio.

Nonostante le misure puntuali, sia di scambi gassosi (ad es., *eddy covariance*) sia di biomassa (ad es., campionamenti distruttivi) permettano di comprendere i processi che guidano le dinamiche del ciclo del carbonio e consentano di quantificare le capacità di sequestro degli ecosistemi forestali, esse non possono essere estese a differenti ecosistemi né essere pienamente utilizzate per generalizzare i risultati su aree più ampie o eterogenee. Un metodo frequentemente utilizzato per il passaggio da osservazioni puntuali a osservazioni distribuite nello spazio e nel tempo è basato sull'integrazione di modelli matematici con immagini satellitari telerilevate (ad es., Running et al. 1999a). L'impiego di questo metodo permette di ottenere stime di scambi di carbonio in differenti ecosistemi e a diverse scale, da regionali a globali.

Tra i modelli per la stima delle diverse componenti del ciclo del carbonio basati sull'utilizzo di dati satellitari, i modelli *Light Use Efficiency* (LUE), nonostante la loro semplicità, permettono di stimare la produzione primaria con accuratezza comparabile a quella di modelli molto più complessi (ad es., Heinsch et al. 2003, Cook et al. 2008). Questi modelli sono stati impiegati con successo a scala globale e continentale per la stima della produttività primaria lorda o netta giornaliera e annuale a partire da dati satellitari con basse risoluzioni al suolo, in genere pari a 1 km (ad es., Turner et al. 2006a, Running et al. 1999b, Chirici et al. 2007, Ni 2004, Waring et al. 1998, Kutsch et al. 2005, Whittaker et al. 1974, Groen et al. 2006, Nadelhoffer et al. 1985, Gower et al. 2001, Shvidenko et al. 2007, Pregitzer & Euskirchen 2004, Yuste et al. 2005, Heinsch et al. 2006, Maselli et al. 2009), ma solo raramente

con una maggior risoluzione spaziale per analisi a livello regionale. L'applicazione di tali modelli a un livello di dettaglio maggiore richiede infatti la disponibilità di mappe a elevata risoluzione spaziale e temporale di una serie di *driver* del modello (ad es., meteorologia, uso del suolo) frequentemente non disponibili e/o di difficile realizzazione.

Lo scopo della presente ricerca è la realizzazione di mappe delle componenti del ciclo del carbonio dei principali ecosistemi agricoli e forestali della regione Lombardia impiegando un modello LUE guidato da immagini satellitari. Il modello MOD17 (Heinsch et al. 2006) è stato a tal fine parametrizzato per le differenti tipologie agro-forestali presenti nel territorio analizzato ed applicato a scala regionale con una risoluzione spaziale di 250 m. Vengono presentati i risultati ottenuti relativamente al periodo 2002-2004, discussa la variabilità spaziale e temporale del ciclo del carbonio degli ecosistemi analizzati e presentata una preliminare validazione tra le stime modellate e quelle misurate in campo.

## Materiali e metodi

### Descrizione del modello impiegato

La stima della produttività degli ecosistemi agro-forestali lombardi è stata realizzata impiegando il modello MOD17.v05 (Heinsch et al. 2003, Heinsch et al. 2006), basato sull'approccio LUE. Il modello stima la GPP giornaliera (gC m<sup>-2</sup> giorno<sup>-1</sup>) tramite la relazione (eqn. 2):

$$GPP_d = \epsilon_d \cdot PAR_d \cdot fAPAR_d$$

dove  $PAR_d$  è la radiazione fotosinteticamente attiva osservata nel giorno  $d$ ,  $fAPAR_d$  la frazione della PAR assorbita da parte della copertura vegetale nel giorno considerato, mentre  $\epsilon_d$  è il coefficiente di conversione luce-biomassa (gC MJ<sup>-1</sup>) relativo al giorno  $d$ , che è determinato tramite la seguente relazione (eqn. 3):

$$\epsilon_d = \epsilon_{max} \cdot TMIN_{scalar} \cdot VPD_{scalar}$$

dove  $\epsilon_{max}$  è il coefficiente di conversione luce-biomassa potenziale, quindi in assenza di limitazioni all'assimilazione.  $TMIN_{scalar}$  e  $VPD_{scalar}$  sono i coefficienti giornalieri di attenuazione del coefficiente  $\epsilon_{max}$  che ne riducono il valore in presenza di condizioni di temperatura o di VDP (*Vapour Pressure Deficit*) subottimali. Tali coefficienti sono compresi tra 0 e 1 e sono calcolati dai valori di temperatura minima giornaliera e di VDP diurna del giorno considerato. L'algoritmo assume l'esistenza di una temperatura minima giornaliera al di sotto della quale la fotosintesi è

completamente inibita e di una temperatura minima giornaliera al di sopra della quale l'efficienza di conversione luce-biomassa non è limitata. Il valore della VPD diurna viene invece utilizzato come un indice di stress idrico della copertura vegetale. Si suppone che l'assimilazione di carbonio sia completamente limitata con elevato potere traspirante dell'atmosfera, che influenza i processi di apertura stomatica. Il coefficiente  $\epsilon_{\max}$  ed i fattori limitanti sono variabili a seconda della specie vegetale considerata e la loro corretta parametrizzazione è di fondamentale importanza ai fini di una corretta modellizzazione della produzione primaria.

Una volta calcolata la GPP giornaliera, il modello stima la fotosintesi netta giornaliera [ $PSN_{\text{Net}}(d)$ ] sottraendo ai valori di  $GPP_d$  la respirazione di mantenimento giornaliera di foglie e radici fini. Tali respirazioni sono stimate a partire dai valori di indice di area fogliare (LAI) della copertura vegetale al giorno considerato e della temperatura media giornaliera. Il valore di NPP annuale viene infine determinato mediante la relazione (eqn. 4):

$$NPP = \left[ \sum_{d=1}^N PSN_{\text{Net}}(d) \right] - \text{Livewood}_{MRy} - \text{Growth}_{Ry}$$

dove  $\text{Livewood}_{MRy}$  ( $\text{gC m}^{-2} \text{anno}^{-1}$ ) è la respirazione di mantenimento annuale della biomassa legnosa, stimata in base al LAI massimo annuale, mentre  $\text{Growth}_{Ry}$  ( $\text{gC m}^{-2} \text{anno}^{-1}$ ) è la respirazione di crescita annuale, che viene supposta pari al 25% della NPP annuale (Zhao et al. 2006).

La NEP annuale delle categorie forestali della regione Lombardia è stata infine stimata moltiplicando la GPP annuale (calcolata come somma dei valori di  $GPP_d$ ) per i valori tipici del rapporto tra GPP e NEP annuali relativi ai diversi tipi funzionali ricavati da Luysaert et al. (2007).

L'applicazione del modello a scala regionale richiede la conoscenza di numerosi parametri eco-fisiologici specie-specifici degli ecosistemi investigati, di mappe giornaliere di LAI e fAPAR delle coperture vegetali e di mappe giornaliere relative ai parametri meteorologici. I metodi impiegati per ricavare tali parametri sono presentati nelle sezioni successive.

#### Definizione delle categorie agro-forestali e dei parametri eco-fisiologici

Il modello MOD17 è stato applicato considerando 16 differenti categorie forestali, 4 categorie agricole rappresentative dell'uso del suolo nell'area lombarda e la categoria pascoli. In particolare, per le catego-

rie forestali sono state considerate le categorie quercocarpineti, querceti, castagneti, ornio-ostrieti, acerfrassineti, betuleti e corileti, faggete, mughete, piceofaggete, abieteti, peccete, lariceti-cembrete, alneti, formazioni a pioppo, sorbo e maggiociondolo alpino, robinieti e pinete, mentre per quanto riguarda le aree agricole sono state considerate le classi mais, riso, cereali e colture foraggere.

Per quanto riguarda le aree forestali, la distribuzione spaziale delle diverse categorie è stata ricavata tramite aggregazione delle diverse tipologie forestali della Carta delle Tipologie Forestali ERSAF della Regione Lombardia (Del Favero 2002). Per quanto riguarda le aree agricole e i pascoli, la distribuzione delle diverse classi sul territorio è stata invece derivata dall'analisi dei dati inventariali SIARL (Regione Lombardia 2008) e dalla mappa di uso del suolo DUSAF (ERSAF 2007).

Per ciascuna specie vegetale presente nelle diverse categorie, i dati relativi al coefficiente di conversione radiazione-biomassa  $\epsilon_{\max}$  sono stati ricavati principalmente dagli studi di Heinsch et al. (2003), Turner et al. (Turner et al. 2003, Turner et al. 2006b) e Reichstein et al. (2004). I dati relativi allo *Specific Leaf Area* (SLA) e ai rapporti di allocazione necessari per il computo della componente respirativa sono stati ricavati dagli studi di White et al. (2000), Mollicone et al. (2003) e Running et al. (1999a). Per le specie forestali per le quali non erano disponibili dati di letteratura, i parametri sono stati fissati ai valori tipici riportati in letteratura per i diversi tipi funzionali di ecosistema, come definiti dall'*International Geosphere-Biosphere Programme* (ad es., foreste di latifoglie decidue, foreste di aghifoglie sempreverdi, ecc.). Per quanto riguarda le categorie agricole i parametri sono stati invece ricavati dagli studi di Bichini et al. (2006) per la classe cereali e riso e da Lindquist et al. (2005) per la classe mais. La parametrizzazione completa delle categorie utilizzate nella fase di spazializzazione è riportata in Colombo et al. (2008).

I valori dei parametri eco-fisiologici relativi alle categorie forestali caratterizzate dalla significativa presenza di due o più specie sono stati successivamente calcolati come media dei parametri relativi a ciascuna specie presente, pesata in funzione della percentuale di copertura della specie stessa all'interno della categoria considerata. La composizione in specie di ciascuna categoria è stata ricavata da Del Favero (2002), mentre i pesi relativi alla percentuale di copertura di ciascuna specie sono stati dedotti dai dati ERSAF.

### Analisi dei dati meteorologici

Le mappe di temperatura dell'aria sono state ottenute a partire dai dati di temperatura misurati presso le stazioni automatiche di rilevamento meteorologico gestite da ARPA Lombardia, attraverso l'applicazione di un algoritmo di *Optimal Interpolation* (Uboldi et al. 2008, Lussana et al. 2006). L'applicazione dell'algoritmo implementato ha permesso di realizzare mappe di temperatura massima, minima e media dell'aria relative all'intero territorio della regione, con una risoluzione spaziale di 250 metri ed un errore RMSE in *cross-validazione* pari a 1.5°C per le temperature minime, 1.2 °C per le temperature medie e 1.6 °C per le temperature massime (Busetto 2007).

Le mappe di VPD diurno giornaliero sono state realizzate a partire dalle mappe di temperatura, basandosi sull'assunzione secondo la quale il valore di temperatura minima giornaliera può essere considerato una buona approssimazione del valore della temperatura di *dew point* (ad es., Thornton & Running 1999).

Infine, le mappe di PAR incidente sono state realizzate a partire da mappe di radiazione globale incidente (GRAD) giornaliera applicando una relazione empirica ( $PAR = 0.428 \cdot GRAD$  - Monteith & Unsworth 1990). Le mappe di radiazione globale sono state ottenute applicando un algoritmo di ricampionamento bicubico ai dati di GRAD giornaliera stimati per la regione Lombardia a partire dall'analisi di immagini satellitari METEOSAT-7 e riportati nel database *on-line* HelioClim-1 (<http://www.soda-is.com> - Rigollier et al. 2004) ad una risoluzione spaziale di 0.1° di latitudine per 0.1° di longitudine.

### Analisi dei dati satellitari

Le mappe dei parametri fAPAR e LAI, necessarie per caratterizzare la dinamica della vegetazione sono state ottenute da serie temporali dell'indice di vegetazione *Normalised Difference Vegetation Index* (NDVI) calcolato da immagini satellitari MODIS - MOD13-Q1, aventi una risoluzione spaziale pari a 250 metri e una risoluzione temporale di 16 giorni. Le serie temporali dell'indice sono state elaborate utilizzando un algoritmo di filtraggio appositamente sviluppato, allo scopo di rimuovere i principali errori dovuti all'acquisizione delle immagini in condizioni di nuvolosità persistente o scarsa visibilità.

I valori di fAPAR per ciascuna categoria agro-forestale sono stati calcolati a partire dai valori di NDVI utilizzando la relazione empirica proposta da Sellers et al. (1994) - eqn. 5:

$$fAPAR_d = \frac{(NDVI_d - NDVI_{min}) \cdot (fAPAR_{max} - fAPAR_{min})}{(NDVI_{max} - NDVI_{min})}$$

dove  $fAPAR_d$  è il valore di frazione di radiazione fotosinteticamente attiva assorbita dalla vegetazione presente in un generico pixel al giorno  $d$ ,  $NDVI_d$  è il valore di NDVI misurato al giorno  $d$ , mentre  $NDVI_{min}$ ,  $NDVI_{max}$ ,  $fAPAR_{min}$  e  $fAPAR_{max}$  sono i valori massimi e minimi di NDVI e fAPAR attesi per la tipologia di superficie presente nel pixel considerato. I valori di  $fAPAR_{min}$  e  $fAPAR_{max}$  sono stati posti rispettivamente a 0.01 e a 0.95 per tutte le tipologie di superficie. Il valore  $NDVI_{min}$  è stato impostato invece al valore 0.50, mentre il valore di  $NDVI_{max}$  è stato posto al valore 0.95 per le superfici forestali e a 0.90 per le superfici agricole, a seguito di un'analisi dei valori massimi di NDVI massimi osservati per le diverse classi. I valori di LAI nei diversi giorni relativi ai diversi pixel sono invece stati calcolati a partire dalle mappe di  $fAPAR_d$ , utilizzando la legge di Lambert-Beer.

### Applicazione del modello a scala regionale

I risultati ottenuti dall'applicazione delle procedure sopra descritte sono stati utilizzati come *input* per applicare il modello MOD17 a scala regionale, per gli anni 2002, 2003 e 2004.

Il modello è stato applicato ai pixel delle immagini MODIS all'interno dei quali la percentuale di superficie occupata da una delle categorie agro-forestali risultava superiore al 75% del totale (pixel puri). Per i restanti pixel dell'immagine, la produzione primaria lorda e netta delle diverse categorie di superficie presenti sono state calcolate in base ai valori modellati in corrispondenza del pixel MODIS puro più vicino appartenente alla stessa categoria di superficie.

Per ciascun pixel  $i$ , i valori di  $GPP_i$ ,  $NPP_i$  e  $NEP_i$  sono stati calcolati impiegando relazioni del tipo (eqn. 6):

$$NPP_i = \sum_{c=1}^N NPP_{c,i} \cdot fc_{c,i}$$

dove  $NPP_i$  è la produzione primaria annuale stimata per un generico pixel  $i$  dell'immagine MODIS,  $NPP_{c,i}$  è la produttività annuale stimata per la categoria  $c$  nello stesso pixel,  $fc_{c,i}$  è la porzione di territorio occupata dalla categoria  $c$  nel pixel  $i$ , mentre  $n$  è il numero totale di categorie presenti nel pixel  $i$ .

Per ciascuna categoria è stata successivamente calcolata la corrispondente produttività annuale a livello regionale come sommatoria dei valori di  $GPP_i$ ,  $NPP_i$  e  $NEP_i$  ed infine è stato calcolato il contributo

percentuale di ciascuna categoria rispetto alla produzione totale complessiva della regione Lombardia.

#### *Confronti tra stime di produttività modellate e misure di campo*

Per alcune categorie agro-forestali le stime di NPP ottenute dal modello sono state confrontate con i valori di NPP stimata a terra partendo dai dati di incremento corrente dei Piani di Assestamento Forestale (PAF) della Regione Lombardia ( $NPP_{PAF}$ ). L'assorbimento annuale lordo di carbonio del comparto arboreo delle parcelle selezionate ( $tC\ ha^{-1}\ anno^{-1}$ ) è stato calcolato a partire dai dati di incremento corrente ( $\Delta V_{PAF}$ ,  $m^3\ ha^{-1}\ anno^{-1}$ ) utilizzando la metodica consigliata nel rapporto IPCC *Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry* (Penman et al. 2003) e basata sull'utilizzo dei *Biomass Expansion Factor* (BEF) per la conversione da accrescimento volumetrico a incremento del carbonio stoccato nella componente arborea. I valori di BEF relativi alle diverse categorie forestali sono stati ricavati a partire dal database AFOLU-DATA ([http://afoludata.jrc.it/data\\_fs.cfm](http://afoludata.jrc.it/data_fs.cfm)), in funzione della composizione in specie delle categorie stesse. Il valore di  $NPP_{PAF}$  così ottenuto e da considerarsi pertanto relativo alla componente arborea epigea, decurtato dell'effetto degli assorbimenti legati alla crescita delle foglie e delle radici fini e privo delle emissioni dovute a disturbi. Le stime di  $NPP_{PAF}$  sono state condotte per il periodo 1990-2001 e per le sole aree governate a fustaia, a causa della scarsità di dati riguardanti le aree a ceduo.

Per garantire la confrontabilità tra  $NPP_{PAF}$  e le stime di NPP annuale ottenute dai dati satellitari è stato necessario sottrarre ai valori modellati gli assorbimenti legati alla crescita delle foglie e delle radici fini. Questi ultimi sono stati stimati sulla base dei rapporti di allocazione tra i diversi comparti della pianta utilizzati nel modello BIOME-BGC (Running & Coughlan 1988) per le differenti tipologie funzionali. Il valore medio nei tre anni considerati ottenuto da tale sottrazione ( $NPP_{COR}$ ) è stato quindi confrontato con le stime di  $NPP_{PAF}$ .

Il confronto tra  $NPP_{COR}$  e  $NPP_{PAF}$  è stato realizzato considerando unicamente i dati relativi a particelle forestali caratterizzate da un'area basimetrica superiore a  $30\ m^2\ ha^{-1}$ , come suggerito in Chirici et al. (2007) e considerando le particelle forestali di dimensioni tali da includere al loro interno almeno un pixel puro di 250m. L'accuratezza delle stime ottenute è stata valutata sia a livello di singole parcelle assestate sia a livello di valori aggregati a scala regionale.

È stato inoltre condotto un confronto tra le stime di GPP e di NPP annuale ottenute dal modello MOD17 con i valori di GPP e NPP stimati a partire da misure *eddy covariance* ( $GPP_{EDDY}$ ) e dati biometrici in due ecosistemi agro-forestali di pianura. I dati sono stati acquisiti presso i siti sperimentali di Zerbolò (PV) e Vigevano (PV) entrambi appartenenti alla rete *CarboEurope* e relativi ad un impianto di pioppo tradizionale (periodo 2002-2004) e un impianto di pioppo a ciclo breve (*Short Rotation Forest* - 2005), rispettivamente. Per una descrizione completa dei siti si rimanda agli studi di Migliavacca et al. (2009) e Zenone (2007).

## **Risultati e discussione**

### *Variabilità spaziale e temporale di NPP e NEP*

In Fig. 1 sono mostrate le mappe di NPP ottenute per l'anno 2002 relativamente alle categorie agro-forestali faggete e mais. La NPP stimata varia considerevolmente a seconda della categoria considerata e all'interno della stessa categoria presenta una discreta variabilità spaziale. Ad esempio, per quanto riguarda il comparto agricolo, si possono osservare anomalie di produttività al confine tra le province di Cremona e Mantova, in particolare per il mais, per il quale durante l'anno 2002 si osservano riduzioni di produttività del 25% rispetto ai comprensori del lodigiano.

I valori medi di NPP stimati per le categorie agro-forestali nei tre anni considerati sono riportati in Fig. 2a, mentre i valori di NEP annuale delle categorie forestali sono mostrati in Fig. 2b.

Per quanto riguarda le superfici agricole, i valori massimi di NPP sono relativi alle aree coltivate a mais con valori medi pari a  $0.79\ KgC\ m^{-2}\ anno^{-1}$ , mentre per le superfici forestali i valori massimi di NPP sono stati riscontrati per le latifoglie decidue dell'area prealpina. I valori massimi di NEP annuale sono stati osservati per gli acero frassineti ( $NEP = 0.55\ KgC\ m^{-2}\ anno^{-1}$ ), mentre valori più ridotti di NEP sono stati stimati per le foreste di conifere della fascia montana e alpina (ad es.,  $0.20\ KgCm^{-2}\ anno^{-1}$  per gli abieteti).

Analizzando la variabilità interannuale della produzione primaria stimata per le diverse categorie si può osservare una riduzione statisticamente significativa ( $p < 0.01$ ) della NPP nell'anno 2003 per le superfici distribuite principalmente in pianura (ad es., "mais", "cereali", "pioppo, sorbo, maggiociondolo") e un aumento della produttività per le foreste e i pascoli in aree prealpine e alpine (ad es., "faggete",

“castagneti”,  $p < 0.01$ ). L'entità delle riduzioni è in accordo alle stime e agli studi condotti a livello Europeo che mostrano come le elevate temperature associate alle scarse precipitazioni registrate nel 2003 hanno portato ad una riduzione (circa il 20%) della  $CO_2$  assorbita dagli ecosistemi di pianura (Ciais et al. 2005). Tra le categorie di pianura il riso ha invece mantenuto una produzione primaria stabile nei tre anni. L'incremento di produttività osservato per le foreste può essere stato generato dalle temperature primaverili anomale che hanno provocato un significativo anticipo del ciclo fenologico alle alte quote e un complessivo aumento della fotosintesi (ad es., Jolly et al. 2005, Vetter et al. 2007). La Fig. 3 mostra le variazioni spaziali della differenza tra produzione primaria netta stimata per l'anno 2003 e i valori medi dei tre anni analizzati per le categorie forestali e agricole.

#### Accuratezza delle stime

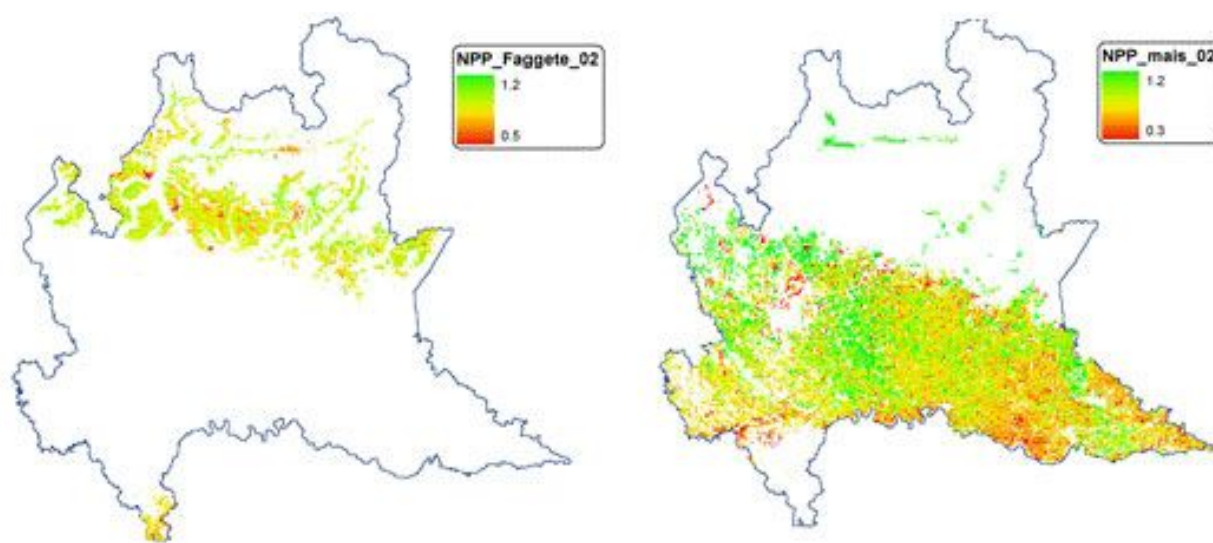
L'analisi a livello di parcella non ha evidenziato relazioni statisticamente significative tra le stime di produzione primaria modellata e misurata (dati non mostrati). I risultati riscontrati per le categorie forestali “peccete”, “abieteti” e “lariceti e cembrete”, aggregati a livello regionale, sono mostrati in Tab. 1. Per la categoria peccete si può osservare un ragionevole accordo tra le stime, mentre per le altre due categorie forestali si osserva una scarsa corrispondenza tra  $NPP_{COR}$  e  $NPP_{PAF}$ .

La stima di  $NPP_{COR}$  è affetta da numerose incertezze e in primo luogo dai coefficienti utilizzati per ri-

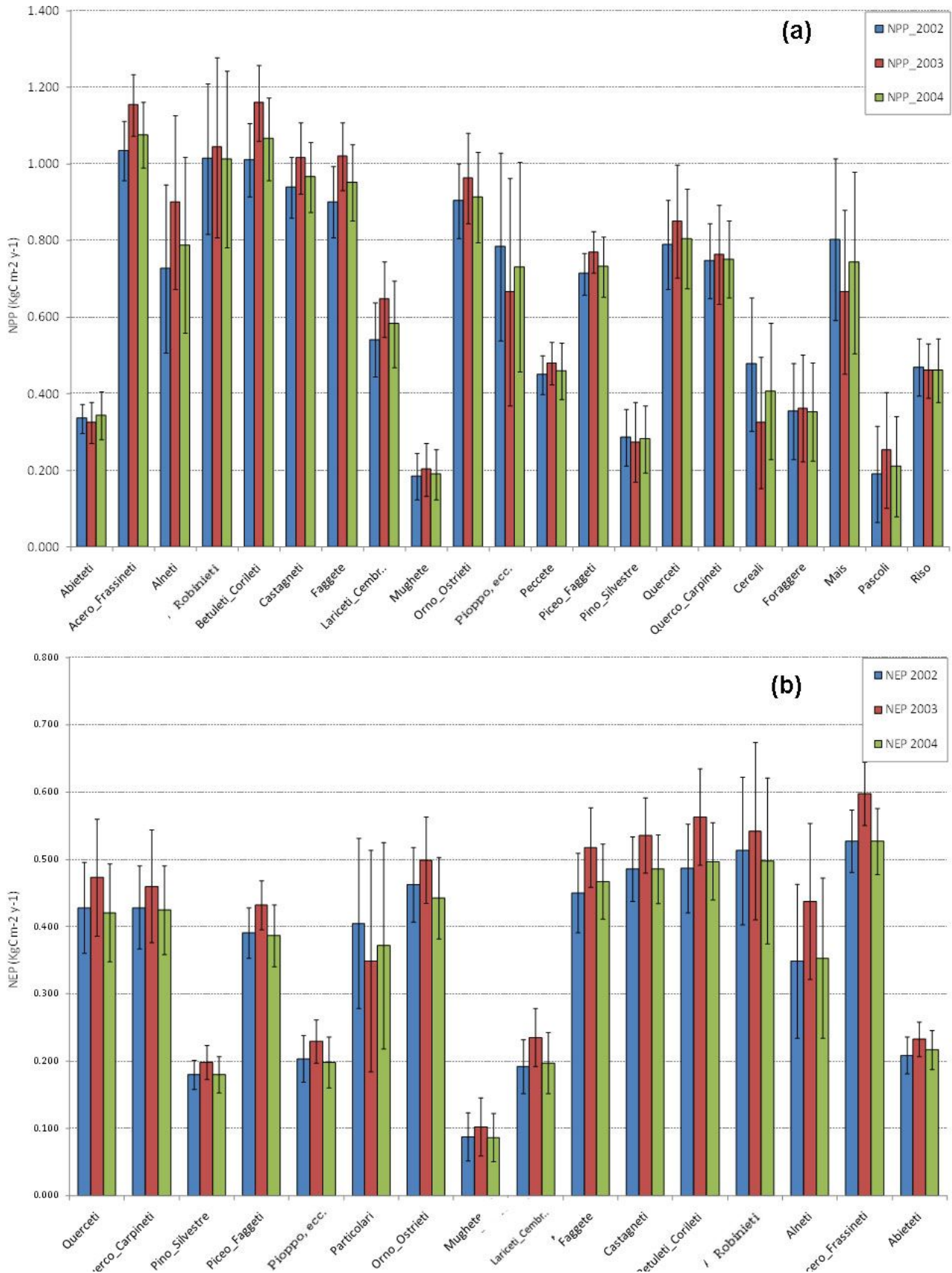
muovere l'influenza di foglie e radici finì a partire dalle stime del modello MOD17. Per i lariceti e le cembrete,  $NPP_{COR}$  può inoltre contenere un addizionale effetto legato al contributo del sottobosco erbaceo e arbustivo che altera la stima e ne riduce la variabilità spaziale. Infine, la risoluzione spaziale di  $NPP_{COR}$  comporta sovente l'esistenza di pixel misti che mal si prestano ad un confronto diretto con il valore di  $NPP_{PAF}$  della parcella esaminata. Occorre inoltre considerare che le differenze tra gli anni di compilazione dei PAF (1990-2001) e gli anni di acquisizione dei dati satellitari (2002-2004) possono inficiare i risultati del confronto, in particolar modo per le parcelle che hanno subito incendi, valanghe, tagli o gestioni differenziate nel tempo. Occorre infine notare che anche la stima  $NPP_{PAF}$  può essere affetta da errore a seguito dell'incertezza dei coefficienti BEF impiegati per convertire l'incremento volumetrico annuo nelle stime di  $NPP_{PAF}$ .

I risultati del confronto tra GPP modellizzata e quella ricavata alle stazioni di misura dei flussi nei due siti di pianura sono mostrati in Fig. 4a. In questo caso si osserva un ottimo accordo tra le stime, con errori percentuali sempre minori al 3% per i cinque anni considerati.

In Fig. 4b sono riportate le stime di NPP ottenute da misure biometriche e i valori di  $NPP_{COR}$  stimati con il modello negli stessi siti. Sebbene si osserva una considerevole sovrastima relativamente all'anno 2003 i risultati di questo confronto mostrano un buon accordo tra le stime e testimoniano la buona capacità di simulazione del modello impiegato.



**Fig. 1** - Mappe di NPP annuale ( $KgC\ m^{-2}\ anno^{-1}$ ) delle categorie “Faggete” e “Mais” per l’anno 2002 (fonte: Fondazione Lombardia per l’Ambiente 2008).



**Fig. 2** - Valori di NPP stimati per le categorie agro-forestali (a) e di NEP stimati per le categorie forestali nei tre anni analizzati (b). I valori riportati si riferiscono alla media  $\pm$  1 dev. st.

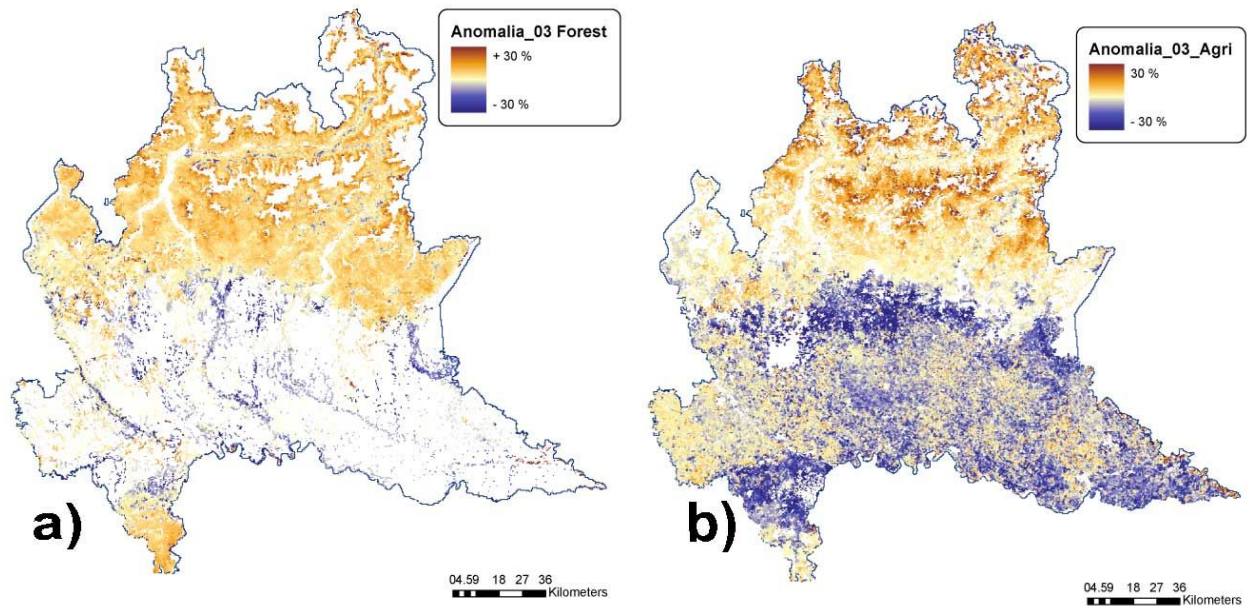


Fig. 3 - Differenze tra NPP stimata per l'anno 2003 e la media dei tre anni considerati relativamente alle aree forestali (a) e alle aree agricole e ai pascoli (b).

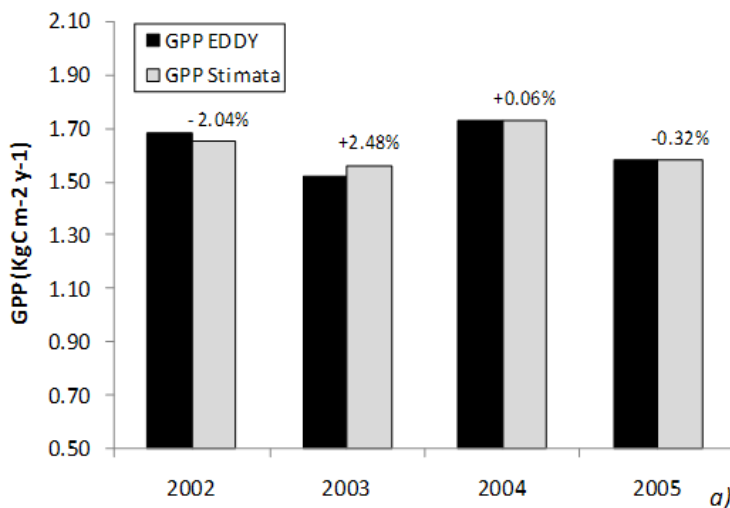
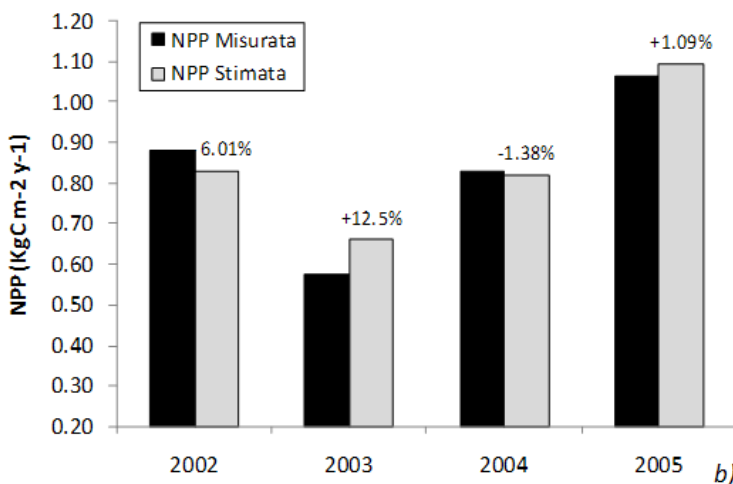


Fig. 4 - Confronto tra i valori di GPP annuale (in alto) e di NPP annuale (in basso) derivati da misure di eddy covariance con quelli stimati dal modello MOD17. I dati relativi agli anni 2002, 2003 e 2004 si riferiscono al sito sperimentale di Zerbolo (piantazione di pioppo tradizionale), mentre quelli relativi all'anno 2005 si riferiscono al sito sperimentale di Vigevano (impianto di pioppo a ciclo breve - Short Rotation Forest). Il valore riportato sopra le barre rappresenta l'errore percentuale della stima.





Nel complesso riteniamo che questi risultati evidenzino il notevole potenziale offerto dalle tecniche di telerilevamento ai fini della stima della produzione primaria degli ecosistemi agricoli e forestali. È necessario tuttavia migliorare alcuni deficit nella struttura del modello e effettuare una esaustiva validazione dei risultati per comprendere la reale bontà delle stime. Nuove valutazioni sull'accuratezza potrebbero essere condotte sfruttando in modo congiunto i dati relativi ai recenti inventari forestali nazionali e valori di BEF maggiormente rappresentativi delle tipologie locali. Ulteriori attività di validazione potrebbero essere condotte per valutare anche le stime delle produzioni agricole, che in questo studio non sono state affrontate. Per verificare appieno l'affidabilità delle stime sarebbe inoltre necessario ampliare la rete di misura dei flussi di carbonio nel territorio regionale, che consentirebbe di ottenere preziose stime sulla capacità di sequestro dei diversi ecosistemi agro-forestali.

#### *Incidenza delle foreste lombarde nel bilancio del carbonio*

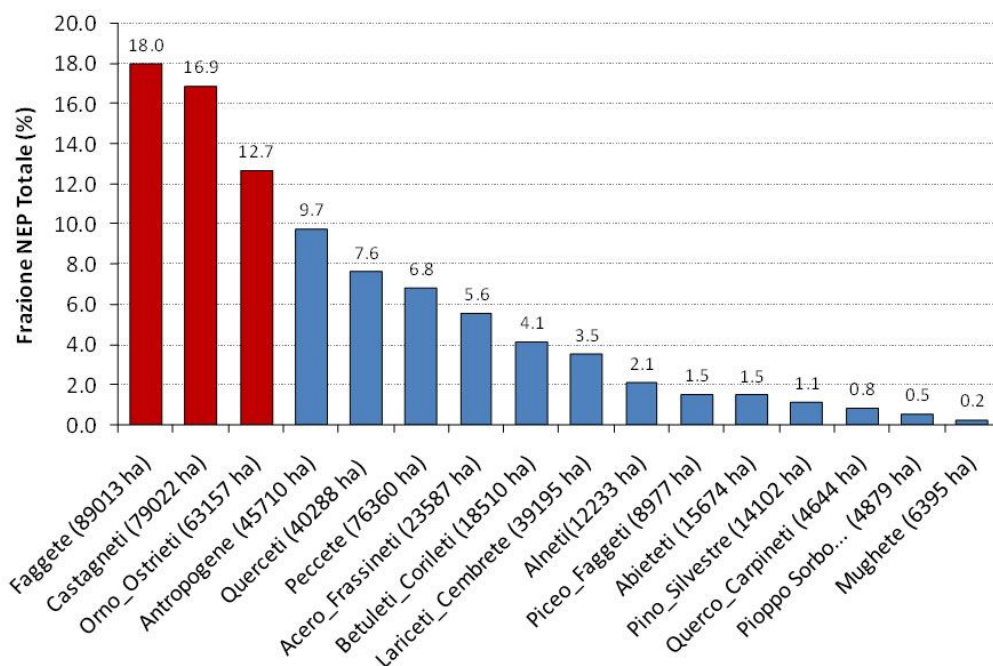
Il contributo percentuale di ciascuna categoria forestale rispetto alla NEP complessiva regionale è mostrato in Fig. 5. Si può osservare come il principale

**Tab. 1** - Confronto tra dati di assorbimento di carbonio medi ricavati dai PAF ( $NPP_{PAF}$ ) e quelli stimati dal modello ( $NPP_{COR}$ ) per le tre categorie forestali considerate.

Categorie forestali	Assorbimento annuale misurato ( $NPP_{PAF}$ , $tC\ ha^{-1}\ anno^{-1}$ )	Assorbimento annuale stimato ( $NPP_{COR}$ , $tC\ ha^{-1}\ anno^{-1}$ )
Peccete	2.29 ( $\pm 0.82$ )	2.59 ( $\pm 0.20$ )
Lariceti-cembrete	1.90 ( $\pm 1.26$ )	3.09 ( $\pm 0.37$ )
Abieteti	2.44 ( $\pm 0.89$ )	1.85 ( $\pm 0.19$ )

contributo sia fornito dalle foreste di latifoglie dell'area prealpina (faggete, castagneti e orno-ostrieti), che forniscono circa il 60% della produttività ecosistemica netta complessiva.

L'analisi delle mappe di produzione primaria totale mostra come le superfici forestali presentino complessivamente una NPP di circa  $5\ Mt\ C\ anno^{-1}$ , cui corrisponde una NEP stimata in circa  $2.4\ Mt\ C\ anno^{-1}$  ( $8.76\ MtCO_2\ anno^{-1}$ ). Queste stime forniscono preziose indicazioni sull'incidenza potenziale delle foreste lombarde nel bilancio del carbonio a scala regionale. A fronte di circa  $93\ MtCO_2$  equivalente di origine antropica emesse in un anno nella regione Lombardia, il comparto forestale lombardo è in grado di sequestrarne potenzialmente circa un decimo. Va tuttavia precisato che questa capacità di sequestro è da considerarsi potenziale, in quanto la NEP non considera il contributo dei disturbi e delle utilizzazioni nel bilan-



**Fig. 5** - Porzione della NEP totale per le diverse categorie forestali. Tra parentesi sono riportate le estensioni a livello regionale.

cio del carbonio. Per poter fornire informazioni relative alle effettive capacità di *sink* degli ecosistemi terrestri lombardi, sarebbe necessario includere nelle stime di NEP dati precisi relativi alle emissioni di CO<sub>2</sub> derivanti dalle utilizzazioni e dai disturbi. Tali dati a livello regionale sono ad oggi difficilmente reperibili e soggetti ad una forte incertezza, ma rappresentano l'informazione chiave per sviluppare ulteriormente la metodologia proposta e per stimare gli assorbimenti di biossido di carbonio a livello regionale da parte degli ecosistemi terrestri.

## Conclusioni

In questo studio sono state stimate le principali componenti del ciclo del carbonio degli ecosistemi agricoli e forestali della regione Lombardia mediante l'applicazione del modello LUE MOD17 appositamente parametrizzato per l'area di studio. Sono state realizzate mappe di produttività primaria lorda, netta e della produttività ecosistemica netta a scala regionale con risoluzione spaziale pari a 250m relativamente al periodo 2002-2004. Sfruttando l'elevata risoluzione spaziale dei dati a disposizione (tipologie forestali, superfici meteorologiche e dati satellitari) il modello ha permesso di ottenere mappe di dettaglio e che hanno consentito di analizzare quantitativamente un territorio estremamente frammentato quale quello della regione Lombardia. I risultati hanno consentito di comprendere, seppur preliminarmente, il contributo delle foreste lombarde nel bilancio del carbonio a scala regionale e costituiscono una preziosa base per analisi spaziali e temporali e per la valutazione dell'impatto degli eventi estremi sugli ecosistemi terrestri a scala regionale.

Ulteriori attività di perfezionamento dei modelli e del processo di validazione risultano comunque necessari per aver conferma della reale attendibilità del metodo proposto in vista di un suo utilizzo come strumento di monitoraggio del ciclo del carbonio degli ecosistemi agro-forestali a scala regionale.

## Ringraziamenti

Questa ricerca è stata condotta nell'ambito del Progetto Kyoto Lombardia (<http://www.kyotolombardia.org>). Gli autori desiderano ringraziare: la Dott.ssa Mita Lapi (Fondazione Lombardia per l'Ambiente), il Dott. D. Fasolini (ERSAF), il Dott. F. Monzani (Regione Lombardia), il Dott. C. Lussana (ARPA Lombardia), il Dott. L. Wald (Ecole des Mines de Paris) e il Dott. M. Cappellini (JRC-IES) per la disponibilità a fornire le basi informative. Gli autori ringraziano inoltre i revisori per gli utili suggerimenti ap-

portati alla prima versione del manoscritto.

## Bibliografia

- Bechini L, Confalonieri R, Bocchi S, Maggiore T (2006). Parameterization of a crop growth and development simulation model at sub-model components level. An example for winter wheat (*Triticum aestivum* L.). *Environmental Modelling and Software* 21 (7): 1042-1054. - doi: 10.1016/j.envsoft.2005.05.006
- Busetto L (2007). Stima della produzione primaria netta in ecosistemi agro-forestali mediante analisi di immagini satellitari MODIS. Tesi di dottorato in Scienze Ambientali XX Ciclo, Università di Milano.
- Chapin FS III, Woodwell GM, Randerson JT, Lovett GM, Rastetter EB, Baldocchi DD, Clark DA, Harmon ME, Schimel DS, Valentini R, Wirth C, Aber JD, Cole JJ, Goulden ML, Harden JW, Heimann M, Howarth RW, Matson PA, McGuire AD, Melillo JM, Mooney HA, Neff JC, Houghton RA, Pace ML, Ryan MG, Running SW, Sala OE, Schlesinger WH, Schulze ED (2006). Reconciling carbon-cycle concepts, terminology, and methods. *Ecosystems* 9 (7): 1041-1050. - doi: 10.1007/s10021-005-0105-7
- Chirici G, Barbati A, Maselli F (2007). Modelling of Italian forest net primary productivity by the integration of remotely sensed and GIS data. *Forest Ecology and Management* 246: 285-295. - doi: 10.1016/j.foreco.2007.04.033
- Ciais P, Reichstein M, Viovy N, Granier A, Ogee J, Allard V, Aubinet M, et al. (2005). Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature* 437: 529-533. - doi: 10.1038/nature03972
- Colombo R, Busetto L, Migliavacca M, Meroni M (2008). Stima degli assorbimenti di carbonio del comparto agro-forestale lombardo mediante integrazione di dati telerilevati e modelli biogeochimici. Report finale Progetto Kyoto Lombardia, Fondazione Lombardia per l'Ambiente, Milano, pp. 46.
- Cook BD, Bolstad PV, Martin JG, et al. (2008). Using light-use and production efficiency models to predict photosynthesis and net carbon exchange during forest canopy disturbance. *Ecosystems* 11 (1): 1 26-44. - doi: 10.1007/s10021-007-9105-0
- Del Favero R (2002). I tipi forestali della Lombardia - Inquadramento ecologico per la gestione dei boschi lombardi (Del Favero R ed). Cierre Edizioni, Padova.
- Denman KL, Brasseur G, Chidthaisong A, Ciais P, Cox PM, Dickinson RE, Hauglustaine D, Heinze C, Holland E, Jacob D, Lohmann U, Ramachandran S, da Silva Dias PL, Wofsy SC, Zhang X (2007). Couplings between changes in the climate system and biogeochemistry. In: "Climate change 2007: the physical science basis" (Solomon S et al. eds). Contribution of working group I to the 4<sup>th</sup> assessment report of the intergovernmental panel on climate

- change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- ERSAF (2007). I dati del progetto DUSAF (Destinazione d'uso dei suoli agricolo-forestali). [online] URL: <http://www.cartografia.regione.lombardia.it/geoportale>
- Fondazione Lombardia per l'Ambiente (2008). Progetto Kyoto Lombardia. Edizioni FLA, Milano, pp. 269.
- Gower ST, Krankina O, Olson RJ, Apps M, Linder S and Wang C (2001). Net primary production and carbon allocation patterns of boreal forest ecosystems. *Ecological Applications* 11 (5): 1395-1411. - doi: 10.1890/1051-0761(2001)011[1395:NPPACA]2.0.CO;2
- Groen T, Nabuur G, Schelhaas M (2006). Carbon accounting and cost estimation in forestry projects using CO2Fix V.3. *Climatic Change* 74 (1): 269-288. - doi: 10.1007/s10584-006-1827-z
- Heinsch FA, Reeves M, Votava P, Kang S, Milesi C, Zhao M (2003). User's guide: GPP and NPP (MOD17A2/A3) products. NASA MODIS land algorithm, version 2.0.
- Heinsch FA, Zhao MS, Running SW, Kimball JS, Nemani RR, Davis KJ, Bolstad PV, Cook BD, Desai AR, Ricciuto DM, Law BE, Oechel WC, Kwon H, Luo HY, Wofsy SC, Dunn AL, Munger JW, Baldocchi DD, Xu LK, Hollinger DY, Richardson AD, Stoy PC, Siqueira MBS, Monson RK, Burns SP, Flanagan LB (2006). Evaluation of remote sensing based terrestrial productivity from MODIS using regional tower eddy flux network observations. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 44 (7): 1908-1925. - doi: 10.1109/TGRS.2005.853936
- Jolly WM, Dobbertin M, Zimmermann NE, Reichstein M (2005). Divergent vegetation growth responses to the 2003 heat wave in the Swiss Alps. *Geophysical Research Letters* 32 (2): L18409. - doi: 10.1029/2005GL023252
- Kutsch WL, Liu C, Hormann G, Herbst M (2005). Spatial heterogeneity of ecosystem carbon fluxes in a broadleaved forest in northern Germany. *Global Change Biology* 11 (1): 70-88. - doi: 10.1111/j.1365-2486.2004.00884.x
- Lindquist JL, Arkebauer TJ, Walters DT, Cassman KG and Dobermann A (2005). Maize radiation use efficiency under optimal growth conditions. *Agronomy Journal* 97: 72-78. [online] URL: <http://agron.scijournal.org/cgi/content/abstract/97/1/72>
- Lussana C, Salvati M, Ranci M, Uboldi F (2006). Vertical and horizontal detrending for the optimal interpolation of temperature observations from a high resolution meteorological network. In: "Proceedings of the 6<sup>th</sup> Annual Meeting of the European Meteorological Society", Ljubljana (Slovenia).
- Luyssaert S, Inglisma I, Jung M, et al. (2007). CO<sub>2</sub> balance of boreal, temperate, and tropical forests derived from a global database. *Global Change Biology* 13: 2509-2537. - doi: 10.1111/j.1365-2486.2007.01439.x
- Maselli F, Papale D, Puletti N, Chirici G, Corona P (2009). Combining remote sensing and ancillary data to monitor the gross productivity of water-limited forest ecosystems. *Remote Sensing of Environment* 113: 657-667. - doi:10.1016/j.rse.2008.11.008
- Migliavacca M, Meroni M, Manca G, Matteucci G, Montagnani L, Grassi G, Zenone T, Teobaldelli M, Godeed I, Colombo R, Seufert G (2009). Seasonal and interannual patterns of carbon and water fluxes of a poplar plantation under peculiar eco-climatic conditions. *Agricultural and Forest Meteorology* 149 (9): 1460-1476. - doi: 10.1016/j.agrformet.2009.04.003
- Mollicone D, Matteucci G, Köble R, Masci A, Chiesi M, Smits PC (2003). A model-based approach for the estimation of carbon sinks in European forests. In: "Fluxes of carbon, water and energy in European forests" (Valentini R ed). Springer-Verlag, Berlin.
- Monteith JL, Unsworth MH (1990). Principles of environmental physics. London, UK, pp. 291.
- Nadelhoffer KJ, Aber JD, Melillo JM (1985). Fine roots, net primary production, and soil nitrogen availability: a new hypothesis. *Ecology* 66 (4): 1377-1390. - doi: 10.2307/1939190
- Ni J (2004). Forest productivity of the Altay and Tianshan mountains in the dryland, northwestern China. *Forest Ecology and Management* 202 (1-3): 13-22. - doi: 10.1016/j.foreco.2004.06.033
- Penman J, Gytarsky M, et al. (2003). Good practice guidance for land use, land-use change and forestry. IPCC National greenhouse gas inventories programme and institute for global environmental strategies. Kanagawa, Japan.
- Pregitzer KS, Euskirchen ES (2004). Carbon cycling and storage in world forests: biome patterns related to forest age. *Global Change Biology* 10 (12): 2052-2077. - doi: 10.1111/j.1365-2486.2004.00866.x
- Regione Lombardia (2008). SIARL - Sistema Informativo Agricoltura Regione Lombardia. [online] URL: [www.siarl.regione.lombardia.it/](http://www.siarl.regione.lombardia.it/)
- Reichstein M, Valentini R, Running S, et al. (2004). Improving remote-sensing based GPP estimates (MODIS-MOD17) through inverse parameter estimation with CARBOEUROPE eddy covariance flux data. EGU meeting, Nice 2004, *Geophysical Research Abstracts* 6: 01388.
- Rigollier C, Lefevre M, Wald L (2004). The method Heliosat-2 for deriving shortwave solar radiation from satellite images. *Solar Energy* 77: 159-169. - doi: 10.1016/j.soler.2004.04.017
- Running SW, Baldocchi DD, Turner DP, Gower ST, Bakwin PS, Hibbard KA (1999a). A global terrestrial monitoring network integrating tower fluxes, flask sampling, ecosystem modeling and EOS satellite data. *Remote Sensing of Environment* 77: 149-169. - doi: 10.1016/S0168-1226(99)00043-9

- sing of Environment 70 (1): 108-127. - doi: 10.1016/S0034-4257(99)00061-9
- Running SW, Coughlan JC (1988). A general model of forest ecosystem processes for regional applications. I. Hydrologic balance, canopy gas exchange and primary production processes. *Ecological Modeling* 42: 125-154. - doi: 10.1016/0304-3800(88)90112-3
- Running SW, Nemani RR, Glassy JM, Thornton PE (1999b). MODIS daily photosynthesis (PSN) and annual net primary production (NPP) product (MOD17) algorithm theoretical basis document - Version 3.0.
- Sellers PJ, Los S, Tucker C, Justice C, Dazlich D, Collatz G, Randall D (1994). A global 1 by 1 degree NDVI data set for climate studies. Part 2: The generation of global fields of terrestrial biophysical parameters from the NDVI. *International Journal of Remote Sensing* 15: 3519-3545. - doi: 10.1080/01431169408954343
- Shvidenko A, Schepaschenko D, Nilsson S, Bouloui Y (2007). Semi-empirical models for assessing biological productivity of Northern Eurasian forests. *Ecological Modelling* 204 (1-2): 163-179. - doi: 10.1016/j.ecolmodel.2006.12.040
- Thornton PE, Running SW (1999). An improved algorithm for estimating incident daily solar radiation from measurements of temperature, humidity, and precipitation. *Agricultural and Forest Meteorology* 93: 211-228. - doi: 10.1016/S0168-1923(98)00126-9
- Turner DP, Ritts WD, Cohen WB, Gower ST, Running SW, Zhao M, Costa MH, Kirschbaum AA, Ham JM, Saleska SR, Ahl DE (2006a). Evaluation of MODIS NPP and GPP products across multiple biomes. *Remote Sensing of Environment* 102: 282-292 - doi: 10.1016/j.rse.2006.02.017
- Turner DP, Ritts WD, Cohen WB, Gower ST, Zhao MS, Running SW, Wofsy SC, Urbanski S, Dunn A, Munger JW (2003). Scaling gross primary production (GPP) over boreal and deciduous forest landscapes in support of MODIS GPP product validation. *Remote Sensing of Environment* 88 (3): 256-270. - doi: 10.1016/j.rse.2003.06.005
- Turner DP, Ritts WD, Zhao MS, Kurc SA, Dunn AL, Wofsy SC, Small EE, Running SW (2006b). Assessing interannual variation in MODIS-based estimates of gross primary production, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 44 (7): 1899-1907. - doi: 10.1109/TGRS.2006.876027
- Uboldi F, Lussana C, Salvati M (2008). Three-dimensional spatial interpolation of surface meteorological observations from high-resolution local networks. *Meteorological Applications* 15: 331-345. - doi: 10.1002/met.76
- Vetter M, Churkina G, Jung M, Reichstein M, Zaehle S, Bondeau A, Chen Y, Ciais P, Feser F, Freibauer A, Geyer R, Jones C, Papale D, Tenhunen J, Tomelleri E, Trusilova K, Viovy N, Heimann M (2007). Analyzing the causes and spatial pattern of the European 2003 carbon flux anomaly in Europe using seven models. *Biogeosciences Discuss* 4: 1201-1240.
- Waring RH, Landsberg JJ, Williams M (1998). Net primary production of forests: a constant fraction of gross primary production? *Tree Physiology* 18: 129-134.
- Watson RT, Noble IR, Bolin BN, Ravindranath H, Verardo DJ, Dokken DJE (2000). IPCC special report. Land use, Land use change and forestry - Summary for Policymakers. Cambridge, Cambridge University Press, UK.
- White MA, Thornton, PE, Running SW, Nemani RR (2000). Parameterization and sensitivity analysis of the BIOME-BGC terrestrial ecosystem model: net primary production controls. *Earth interactions* 4 (3): 1-85. - doi: 10.1175/1087-3562(2000)004<0003:PASAOT>2.0.CO;2
- Whittaker RH, Bormann FH, Likens GE and Siccama TG (1974). The Hubbard Brook ecosystem study: forest biomass and production. *Ecological Monographs* 44 (2): 233-254. - doi: 10.2307/1942313
- Yuste JC, Konôpka B, Janssens IA, Coenen K, Xiao CW, Ceulemans R (2005). Contrasting net primary productivity and carbon distribution between neighboring stands of *Quercus robur* and *Pinus sylvestris*. *Tree Physiology* 25 (6): 701-712.
- Zenone T (2007). Measuring terrestrial CO<sub>2</sub> uptake in a short rotation forestry of poplar for bioenergy production: comparison between biometric and micrometeorological technique. Ph.D. thesis, University of Padua, Italy, pp. 105.
- Zhao M, Running SW, Heinsch FA, Nemani RR (2006). Collection 005 change summary for the MODIS land vegetation primary production (17A2/A3) algorithm [online] URL: [http://landweb.nascom.nasa.gov/QA\\_WWW/forPage/C005\\_Change\\_NPP.pdf](http://landweb.nascom.nasa.gov/QA_WWW/forPage/C005_Change_NPP.pdf)