

## **Integrazione di dati telerilevati e raccolti a terra per la stima della produttività lorda e netta delle foreste italiane**

F. Maselli<sup>1</sup>, A. Barbati<sup>2</sup>, M. Chiesi<sup>1</sup>, P. Corona<sup>2</sup>, D. Papale<sup>2</sup>, M. Pasqui<sup>1</sup>, G. Chirici<sup>3</sup>

1. IBIMET-CNR, via Madonna del Piano 10, 50019 Sesto Fiorentino (FI), tel. 055 5226024, e-mail maselli@ibimet.cnr.it
2. DISAFRI, Università della Tuscia, Via San Camillo de Lellis, 01100 Viterbo
3. DISTAT - Università del Molise, Contrada Fonte Lappone snc, 86090 Pesche (IS)

### **Riassunto**

Il lavoro intende presentare il progetto C\_FORSAT finanziato dal MIUR su fondi FIRB-Futuro in Ricerca. L'obiettivo principale è quantificare sia la produzione primaria lorda (GPP) che quella netta (NPP) delle foreste italiane con una risoluzione spaziale di 1 km quadrato. La metodologia proposta prevede l'uso integrato degli output forniti da un modello parametrico, C-Fix, e uno biogeochimico, BIOME-BGC. Il primo è basato sull'uso di dati telerilevati ed è capace di stimare la GPP delle foreste attraverso un approccio tipo Monteith; il secondo è capace di stimare, oltre alla GPP anche i processi respiratori (sia respirazione autotrofa che eterotrofa) e le allocazioni in foreste in condizioni di equilibrio con l'ambiente. L'integrazione degli output di questi modelli è stata effettuata per riportare le stime ottenute ad una situazione reale conseguente ad azioni di disturbo come utilizzazioni o incendi.

Le stime di GPP ottenute sono state confrontate con le misure derivate da alcune torri di misura dei flussi di carbonio presenti sul territorio nazionale, mentre le stime di NPP sono state validate attraverso confronto con dati di incremento corrente di volume derivati dall'ultimo inventario forestale nazionale e aggregati a scala regionale. I risultati dimostrano che la metodologia è potenzialmente capace di produrre stime accurate sia di GPP che di NPP alla risoluzione spaziale utilizzata. L'accuratezza delle stime è dipendente dalla qualità dei dati di input utilizzati, sia telerilevati che meteorologici ed ancillari.

### **Abstract**

The current paper introduces the project C\_FORSAT which has been recently funded by the Italian Ministry for Education, University and Research. The project aims at quantifying both gross (GPP) and net primary production (NPP) of Italian forest ecosystems with a spatial resolution of 1 km<sup>2</sup>. The methodology is based on the integrated exploitation of a parametric model, C-Fix, and a biogeochemical one, BIOME-BGC. The former is driven by remotely sensed data and is able to estimate forest GPP following a Monteith approach; the latter allows to estimate all photosynthesis, respiration and allocation processes of forests in equilibrium conditions. A method to integrate the model outputs is applied to consider all disturbances affecting forest ecosystems, such as thinnings/cuttings and/or forest fires.

The GPP estimates produced have been validated against measurements collected in eight study sites where the eddy correlation technique is applied to measure forest carbon fluxes; NPP estimates have been validated against regional current annual increments derived from the last national forest inventory. The results show that the methodology can reliably estimate both forest GPP and NPP at the considered spatial scale. The accuracy of the estimates is dependent on the quality of the input remotely sensed and ancillary data sets.

## Introduzione

La necessità di quantificare l'impatto delle foreste sul ciclo del carbonio si è accentuata in vista del prospettato cambiamento climatico e dell'applicazione del protocollo di Kyoto. Fra le numerose metodologie proposte per la valutazione dei flussi di carbonio (tecniche di eddy covariance, immagini da satellite e modelli biogeochimici), quelle basate sull'uso di modelli di simulazione dell'ecosistema si sono rivelate particolarmente promettenti. Questi, infatti, permettono di stimare tutte le componenti del ciclo del carbonio a livello forestale (Gross Primary Production, Net Primary Production, e Net Ecosystem Exchange, GPP, NPP, NEE rispettivamente) sulla base delle condizioni ambientali (clima, suolo e tipo di vegetazione).

Il progetto C\_FORSAT, finanziato dal MIUR con fondi FIRB-Futuro in Ricerca, è rivolto a sviluppare e testare una metodologia che consenta di integrare dati da diverse fonti informative al fine di modellizzare l'accumulo di carbonio negli ecosistemi forestali italiani e di analizzarne la produttività nel tempo anche sulla base di scenari di cambiamento sia climatico che di uso del suolo. A tale scopo vengono utilizzati dati convenzionali derivati da cartografia esistente, dati meteorologici multitemporali spazializzati, dati misurati con la tecnica dell'eddy covariance, dati inventariali georeferenziati e dati telerilevati da satelliti con sensori a diversa risoluzione spaziale (Spot-VEGETATION, Terra-MODIS, ecc.).

Il presente lavoro riporta le prime fasi del progetto che riguardano lo sviluppo della metodologia per valutare la quantità di carbonio effettivamente accumulato nelle foreste italiane alla risoluzione spaziale di 1 km<sup>2</sup>. I modelli utilizzati a questo scopo sono di due tipologie: un modello parametrico basato su dati telerilevati ed efficienza di uso della radiazione (C-Fix) (Veroustraete et al., 2002), ed un modello biogeochimico (BIOME-BGC) (Running and Hunt, 1993) capace di riprodurre i processi di fotosintesi e respirazione dell'ecosistema. Altri dati misurati a terra (dati di eddy covariance, dati inventariali georeferenziati, ecc.) sono utilizzati durante la fase di validazione dei risultati ottenuti.

## Area di studio

L'Italia ha una orografia complessa dovuta alla presenza delle Alpi e degli Appennini che la attraversano nel nord e nel centro-sud rispettivamente. Il clima è molto variabile a seconda dei gradienti latitudinale ed altitudinale, oltre che della distanza dal mare: in generale, varia da mediterraneo caldo fino a temperato freddo.

Secondo il database geografico CORINE Land Cover 2000, le foreste italiane coprono circa 9.2 Mha di superficie: il 32% di queste si trovano nella regione alpina, il 16% in quella continentale ed il restante 52% in quella Mediterranea (*sensu* Direttiva Habitat della Commissione Europea 43/92). Secondo i dati dell'inventario forestale nazionale (INFC, <http://www.infc.it>) la maggior parte delle foreste italiane è caratterizzata dalla presenza di specie quercine (*Quercus* spp.) e di faggio (*Fagus sylvatica*). Tra le conifere, le specie più diffuse sono l'abete rosso (*Picea abies*), seguito dai pini montani (*Pinus sylvestris*, *P. nigra*) e mediterranei (*P. halepensis*, *P. pinaster*, *P. pinea*).

## Dati utilizzati

I dati meteorologici sono stati scaricati dall'archivio nazionale dell'UCEA (<http://www.ucea.it>) per il periodo di studio 1999-2008. In particolare sono stati raccolti dati mensili di temperatura minima e massima e precipitazioni da circa 90 stazioni meteorologiche distribuite sul territorio nazionale.

La mappa CORINE Land Cover 2000, in scala nominale 1:100.000, è stata impiegata per ottenere informazioni sulla distribuzione delle foreste; un modello digitale del terreno (DEM) è stato utilizzato per estrarre le informazioni relative alla morfologia delle diverse aree.

Le immagini NDVI per l'applicazione del modello C-Fix sono state ottenute dal satellite Spot-VEGETATION, con risoluzione spaziale di 1 km<sup>2</sup> e temporale pari a 1 mese. Tali immagini sono gratuitamente distribuite da VITO (<http://free.vgt.vito.be>) in formato pre-elaborato con step decennale, successivamente ricampionato tramite MVC su base mensile (Maselli et al., 2009a).

I dati eddy-covariance dei flussi di carbonio utilizzati per il confronto con le stime di GPP ottenute sono stati raccolti da otto torri di misura distribuite su tutto il territorio nazionale e associate a tipi forestali diversi (per maggiori dettagli, Maselli et al., 2009a).

I dati di volume legnoso e incremento corrente annuo di volume legnoso (CAI) sono stati misurati nell'ambito dell'inventario nazionale delle foreste e dei serbatoi di carbonio (INFC) e aggregati per regione e per tipo forestale ([www.infc.it](http://www.infc.it)). Questi valori aggregati di CAI sono stati confrontati con le stime di produttività netta ottenute con la metodologia di seguito sinteticamente illustrata.

### Metodologia

La metodologia proposta e sperimentata si basa sull'uso di dati meteorologici, satellitari ed ancillari prodotti, secondo quanto descritto da Maselli et al. (2009b). I due modelli, BIOME-BGC (opportunamente calibrato: Chiesi et al., 2007; Chiesi et al., 2010) e C-Fix (nella versione adattata alle regioni mediterranee: Maselli et al., 2009a), vengono utilizzati per stimare la GPP e le respirazioni autotrofa ed eterotrofa degli ecosistemi forestali. I risultati prodotti dai due singoli modelli sono poi integrati al fine di sfruttare i vantaggi di entrambi, ovvero la maggior accuratezza del primo nello stimare la produzione primaria lorda e la capacità del secondo di simulare i processi di respirazione ed allocazione (Maselli et al., 2009b). Le stime di flussi ottenute vengono infine corrette per considerare la distanza degli ecosistemi dalla condizione di equilibrio simulata dai modelli. Tale correzione è effettuata usando stime di volume legnoso che sono ottenute tramite elaborazione di dati inventariali (Maselli et al., 2009b; Gallaun et al., 2009; Maselli et al., 2010).

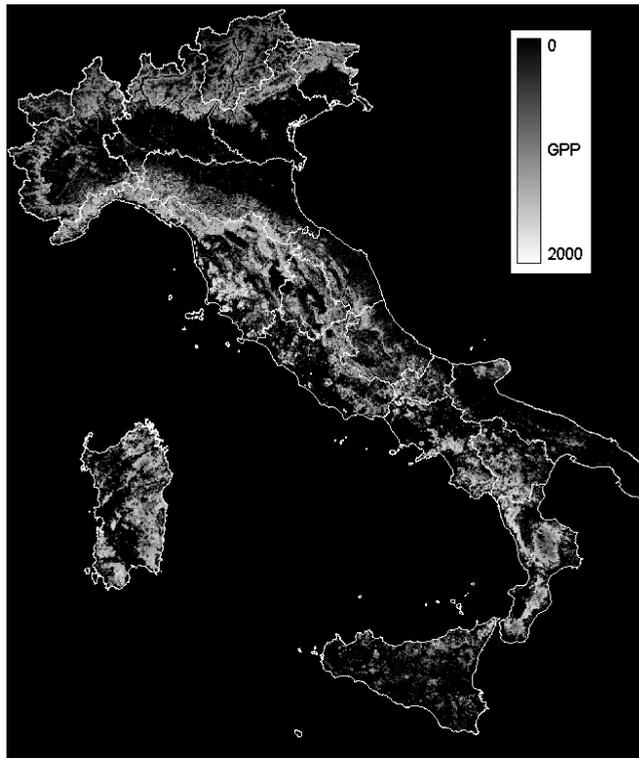


Figura 1 – Mappa di GPP delle foreste italiane relativa all'anno 2008 ( $\text{g C m}^{-2} \text{ anno}^{-1}$ ).

Una volta stimate le produttività primaria lorda e netta a 1 km di risoluzione spaziale per tutto il territorio nazionale coperto da foreste, si è proceduto alla validazione delle stime mediante confronto con i dati di GPP misurati da otto torri di eddy-covariance e con i dati INFC di CAI disponibili per le 20 regioni italiane. Nel secondo caso la ricostruzione del CAI a partire dall’NPP stimata è stata effettuata utilizzando i coefficienti di espansione della biomassa riportati da Federici et al. (2008), come descritto in dettaglio in Maselli et al. (2010).

## Risultati

In Figura 1 si riporta, a titolo di esempio, una immagine della GPP stimata per le foreste italiane per l’anno 2008. In generale i valori di GPP oscillano tra 700 e 2000 g C m<sup>-2</sup> anno<sup>-1</sup>, valori plausibili per ecosistemi mediterranei relativamente produttivi e confrontabili con quelli registrati dalle torri di misura. Dalla mappa è possibile notare due gradienti: uno altitudinale, con valori di GPP più bassi in corrispondenza delle stazioni a quote più elevate, ed uno che segue la direzione nord-sud, con valori più bassi nelle aree meridionali che notoriamente corrispondono a quelle meno piovose.

Il confronto tra i valori di GPP raccolti presso le otto torri di misurazione dei flussi e quelli stimati utilizzando l’approccio integrato da noi utilizzato ha prodotto i risultati riportati in Figura 2. Le stime ottenute sono complessivamente accurate ad eccezione del sito di Lavarone; in questo sito infatti, l’alta densità della foresta e l’orografia complessa non consentono una corretta applicazione tecnica dei metodi di partitioning per la stima della GPP da misure eddy-covariance (Reichstein et al., 2005; Maselli et al., 2009a).

In Figura 3 viene mostrato il confronto tra i valori di CAI riportati dall’INFC e i corrispondenti valori stimati utilizzando l’approccio modellistico integrato. L’accordo tra i dati misurati e stimati è molto buono sia in termini di correlazione ( $r = 0.863$ ) che di errori medi.

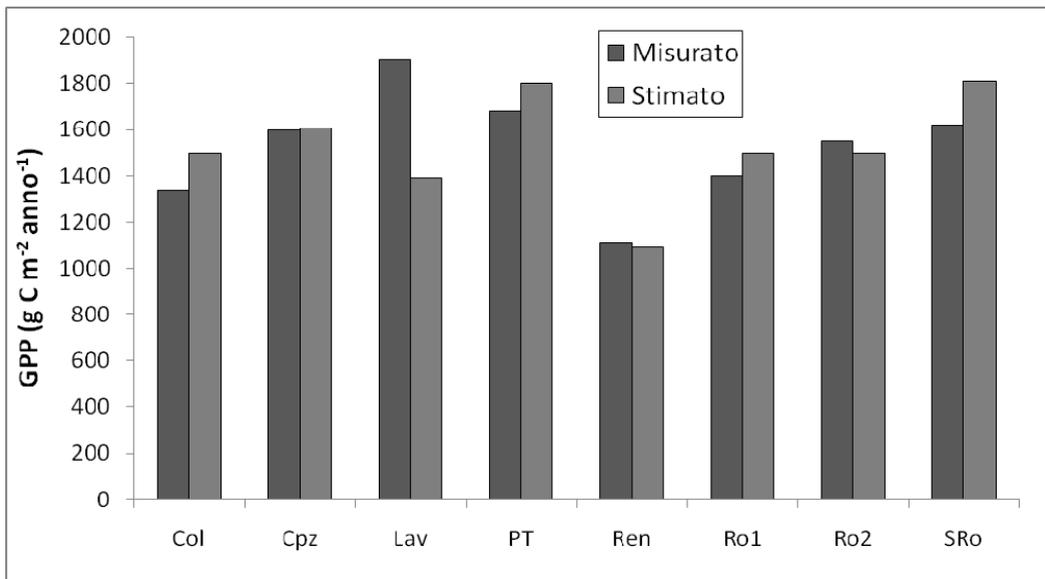


Figura 2 – Confronto tra valori di GPP misurati con tecnica eddy-covariance e valori stimati utilizzando C-Fix modificato (Col, Collelongo, Cpz, Castelporziano; Lav, Lavarone; PT, Parco del Ticino; Ren, Renon; Ro1, Roccarespanpani 1; Ro2, Roccarespanpani 2; SRO, San Rossore).

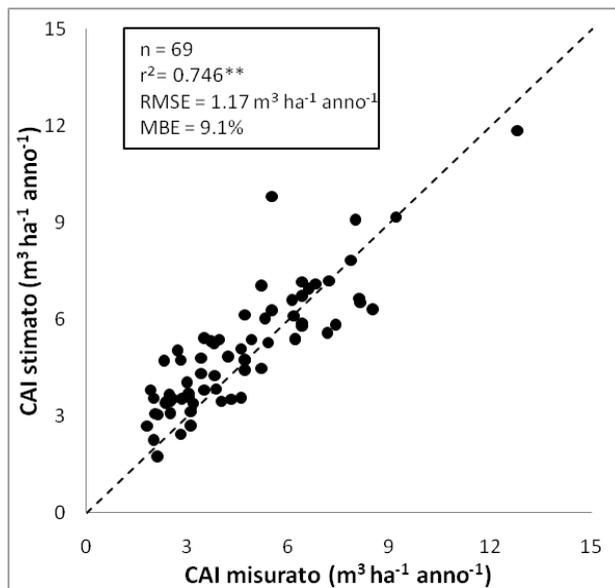


Figura 3 – Confronto complessivo a scala regionale, per i tipi forestali considerati, tra valori di CAI misurati da INFC e quelli stimati con la metodologia proposta (\*\* = r altamente significativo,  $P < 0.01$ ).

### Discussione e conclusioni

La metodologia messa a punto ed applicata nell’ambito del progetto di ricerca C\_FORSAT ha permesso di ottenere stime accurate di carbonio prodotto dagli ecosistemi forestali italiani sia di GPP che di NPP. Questi risultati sono incoraggianti per la prosecuzione degli studi rivolti allo sviluppo di una metodologia operativa di stima dei flussi netti che potrà essere applicata laddove siano disponibili i dati ancillari necessari. Questa metodologia consentirà di effettuare sia un monitoraggio degli ecosistemi forestali ai fini di una loro gestione sostenibile, sia una valutazione degli effetti dovuti a cambiamenti climatici e/o gestionali eventualmente ipotizzabili secondo gli scenari più probabili.

### Ringraziamenti

Gli autori desiderano ringraziare il Dott. M. Moriondo, il Dott. L. Fibbi ed il Prof. M. Bindi per il loro contributo allo sviluppo della metodologia di stima. I dati eddy-covariance sono stati acquisiti nell’ambito del progetto CarboItaly su fondi MIUR FIRS. Il lavoro è stato parzialmente finanziato dal progetto MIUR C\_FORSAT su fondi FIRB-Futuro in Ricerca 2009.

### Bibliografia

- Chiesi, M., Maselli F., Moriondo M., Fibbi L., Bindi M., Running S.W. (2007). “Application of BIOME-BGC to simulate Mediterranean forest processes”. *Ecological Modelling*, 206, 179-190.
- Chiesi, M., Fibbi L., Genesio L., Gioli B., Maselli F., Magno R., Moriondo M., Vaccari F. (2010). “Testing of a strategy to model the carbon fluxes of Mediterranean forest ecosystems”. *International Journal of Applied Earth Observation and Remote Sensing*, in revisione.
- Federici S., Vitullo M., Tulipano S., De Lauretis R. and Seufert G. (2008). An approach to estimate carbon stocks change in forest carbon pools under the UNFCCC: the Italian case. *iForest – Biogeosciences and Forestry*, 1: 86–95.

- Gallaun H., Zanchi G., Nabuurs G.-J., Hengeveld G., Schardt M., Verkerk P.J. (2010). "EU-wide maps of growing stocks and above-ground biomass in forests based on remote sensing and field measurements". *Forest Ecology and Management*, 260 (3), 252-261.
- Maselli F., Papale D., Puletti N., Chirici G., Corona P. (2009a). "Combining remote sensing and ancillary data to monitor the gross productivity of water-limited forest ecosystems". *Remote Sensing of Environment*, 113, 657-667.
- Maselli F., Chiesi M., Moriondo M., Fibbi L., Bindi M., Running, S. W. (2009b). "Integration of ground and satellite data to simulate the forest carbon budget of a Mediterranean region". *Ecological Modelling*, 220, 330-342.
- Maselli F., Chiesi M., Barbati A., Corona P. (2010). Assessment of forest net primary production through the elaboration of multisource ground and remote sensing data. *Journal of Environmental Monitoring*, 12: 1082–1091.
- Reichstein M., Falge E., Baldocchi D., Papale D., Aubinet M., Berbigier P., Bernhofer C., Buchmann N., Gilmanov T., Granier A., Grunwald T., Havrankova K., Ilvesniemi H., Janous D., Knohl A., Laurila T., Lohila A., Loustau D., Matteucci G., Meyers T., Miglietta F., Ourcival J.-M., Pumpanen J., Rambal S., Rotenberg E., Sanz M., Tenhunen J., Seufert G., Vaccari F., Vesala T., Yakir D., Valentini R. (2005). On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: review and improved algorithm. *Global Change Biology*, 11: 1424-1439.
- Running S.W., Hunt E.R. (1993). "Generalization of a forest ecosystem process model for other biomes, BIOME-BGC, and an application for global-scale models." In: Ehleringer, J.R., and Field, C.B. (eds.), *Scaling Physiological Processes: Leaf to Globe*, Academic Press, San Diego, pp. 141-158.
- Veroustraete, F, Sabbe, H., and Eerens, H. (2002). "Estimation of carbon mass fluxes over Europe using the C-Fix model and Euroflux data". *Remote Sensing of Environment*, 83, 376-399.