

# STIMA DELLA FRAZIONE ASSORBITA DELLA RADIAZIONE FOTOSINTETICAMENTE ATTIVA (FAPAR) MEDIANTE DATI TELERILEVATI SATELLITARI E MISURE A TERRA

Roberto COLOMBO<sup>(\*)</sup>, Lorenzo Busetto<sup>(\*,\*\*)</sup>, Terenzio ZENONE<sup>(\*\*\*)</sup>, Michele MERONI<sup>(\*)</sup>,  
Guenther SEUFERT<sup>(\*\*\*)</sup>, Francesco MAGNI<sup>(\*)</sup>, Francesco PIAZZA<sup>(\*)</sup>

<sup>(\*)</sup>Lab. Telerilevamento delle Dinamiche Ambientali, DISAT-UNIMIB, Milano, Italia, Tel: 0264482819; fax: 0264482895; e.mail roberto.colombo@unimib.it, michele.meroni@unimib.it, francesco.magni@gmail.com;

<sup>(\*,\*\*)</sup>CNR - IIA, Roma, Italia, Tel: 0264482819; e.mail lorenzo.busetto@unimib.it

<sup>(\*\*\*)</sup>JRC-IES Climate Change Unit, Via Fermi, Ispra, Italia. Tel: 0332785784; terenzio.zenone@jrc.ir; guenther.seufert.jrc.it

## Riassunto

In questo contributo sono esposte le tecniche e i risultati preliminari raggiunti ai fini della stima della frazione di radiazione fotosinteticamente attiva assorbita/intercettata (fAPAR/fIPAR) dalla vegetazione a partire da misure di terreno e immagini satellitari MODIS.

L'esperimento è stato condotto in un impianto di pioppo ceduo a turno breve dedicato alla produzione di biomassa rinnovabile ad uso energetico. Il modello semiempirico sviluppato per la stima della fAPAR si basa sull'individuazione di una relazione di regressione tra gli indici spettrali misurati da satellite e le misure di terreno effettuate. I risultati raggiunti dimostrano l'esistenza di buone correlazioni tra i dati satellitari e le misure di terreno in termini di coefficiente di correlazione in predizione, il che conferma la possibilità di descrivere le variazioni spaziali e temporali della fAPAR per le piantagioni presenti nell'area indagata a partire da osservazioni remote MODIS 250m.

## Abstract

This paper shows the remote sensing techniques and the preliminary results aimed to estimate the Fraction of Absorbed/Intercepted Photosynthetically Active Radiation (fAPAR/fIPAR) from direct measurements and MODIS satellite images.

The study has been conducted in a short rotation forestry of poplar plantation for bio fuel production. A semi-empirical model for estimating fAPAR was developed by using a regression between vegetation indices and ground measurements. Results show significant relationships in terms of prediction coefficient allowing to map spatial and temporal fAPAR variations of poplar plantation starting from MODIS 250m surface reflectance data.

## Introduzione

Gli impianti cedui a turno breve, dedicati alla produzione di biomassa rinnovabile ad uso energetico, stanno diventando di notevole interesse nell'ambito delle politiche legate allo sviluppo sostenibile grazie alla loro potenziale capacità nel sequestro di carbonio. Infatti, tali impianti potrebbero permettere di produrre energia quasi in pareggio complessivo del bilancio tra assimilazione ed emissione di anidride carbonica in atmosfera. Risulta quindi importante comprendere e quantificare gli scambi di carbonio di tali impianti ai fini di valutare lo sfruttamento di nuove fonti di energia rinnovabile.

In questo contesto, l'impiego di modelli ecologici guidati da informazione telerilevate costituisce un valido approccio per la stima della produzione primaria netta di ecosistema (NPP) a scala regionale

(e.g. Running et al., 1999). In particolare, la conoscenza della radiazione fotosinteticamente attiva assorbita dalla vegetazione (APAR), o la sua rispettiva frazione d'efficienza (fAPAR), sono richieste per lo studio e la modellizzazione dei processi globali della biosfera (e.g. Sellers et al., 1986) poiché è nota la loro importanza nel regolare alcuni processi legati agli scambi di carbonio tra atmosfera e superfici vegetate.

La radiazione fotosinteticamente attiva assorbita dalla vegetazione viene misurata direttamente *in situ* impiegando piranometri e ceptometri e risolvendo il bilancio radiativo (Daughtry et al., 1992), oppure indirettamente a partire dalla conoscenza dell'Indice di Area Fogliare (e.g. Chen, 1996; Nouvellon et al., 2000). Negli ultimi anni sono stati sviluppati metodi per stimare la fAPAR a partire da osservazioni remote satellitari, basati sull'utilizzo di modelli semiempirici con indici di vegetazione calcolati a partire da misure delle riflettanze spettrali (e.g. Hanan et al., 1996; Ridao et al., 1998; Fensholt et al., 2004) oppure sull'utilizzo di modelli di trasferimento radiativo che simulano l'interazione tra radiazione e mezzo attraversato (e.g. Myneni et al., 1997; Gobron et al., 2005). In particolare le immagini del sensore MODIS, con risoluzione geometrica di 250 m e frequenza temporale giornaliera, consentono di monitorare il ciclo fenologico delle superfici investigate e permettono di analizzare le variazioni nel tempo di alcuni parametri biofisici e biochimici della vegetazione, tra cui la frazione di radiazione assorbita dalla canopy.

In questo contesto, l'obiettivo principale della ricerca in corso è quello di quantificare la produttività primaria netta di una foresta ad accrescimento veloce rappresentata da un impianto di pioppo ibrido a ciclo breve a scala regionale. In questo contributo vengono illustrate le tecniche di misura diretta della radiazione assorbita e della biomassa utilizzate allo scopo di calcolare il fattore di efficienza di conversione luce biomassa. Vengono inoltre illustrati i risultati dell'analisi di regressione effettuata tra i valori di NDVI ricavati dalle immagini multitemporali MODIS e le misure di fAPAR/fIPAR effettuate nel corso del 2004.

## Metodi

### Sito sperimentale

Il sito sperimentale è rappresentato da una foresta ad accrescimento veloce localizzata a Vigevano (MI) ed è costituito da un impianto di pioppo ceduo a turno breve (*Populus generosa* X *P. nigra* Clone Pegaso). L'impianto, realizzato nella prima decade di marzo 2004, si estende su una superficie complessiva di 66 ha. La densità è di circa 8500 alberi\*ha<sup>-1</sup>, l'altezza varia da 0 a 3.5 m per anno e il taglio avviene ogni anno ai fini della produzione di biomassa. Il sito sperimentale appartiene alla rete CARBOEUROFLUX ed è gestito dall'Institute for Environment and Sustainability del JRC-EC di Ispra. Il sito è dotato di una stazione permanente di misura delle variabili micrometeorologiche e dei flussi di acqua e carbonio attraverso la tecnica di eddy covariance per lo studio degli scambi gassosi tra atmosfera e vegetazione (Fig. 1). Le coordinate della torre di misura nel sistema UTM-WGS84 Fuso Nord sono Est: 489982, Nord: 5016338.



Figura 1. Sito sperimentale di Vigevano

### Misura di biomassa

Le misure di biomassa epigea sono state condotte nel corso del ciclo fenologico 2004. All'interno della piantagione sono state delimitate due parcelle sperimentali di 40x40m ed in ognuna di esse sono state delimitate 30 sub-parcelle distanti ognuna 16.5 m, di superficie pari a 1m<sup>2</sup>. A partire dal

mese di giugno con scadenza mensile in ognuna di esse sono stati rilevati il numero dei polloni con altezza superiore a 150 centimetri e il corrispondente diametro a 130 centimetri dal suolo. Ad ogni data di campionamento sono stati inoltre rilevati il peso fresco di fusto e foglie, e il peso secco corrispondente (attraverso essiccamento in forno ventilato a 105 °C sino al raggiungimento del peso costante) di 6 piante selezionate casualmente tra le 30 campionate. I dati raccolti hanno permesso di calcolare i coefficienti dell'equazione allometrica che lega il peso totale secco (PS) con il diametro (D130), nella forma:  $PS = a \times D^b$ .

La biomassa epigea è infine stata calcolata assumendo un rapporto d'allocazione pari al 18 % costante nel tempo. Il contenuto in carbonio è quindi stato calcolato utilizzando un fattore di conversione pari 0.5 (1 g Sostanza Secca= 0.5 g Carbonio).

### Misure di fAPAR

La radiazione fotosinteticamente attiva assorbita dal comparto agro-forestale è stata misurata direttamente *in situ*, risolvendo il bilancio radiativo dei flussi entranti e dei flussi uscenti. Le misure di fAPAR sono state realizzate con un ceptometro (Sun Scan Canopy Analysis System , SS 1, Delta-T) e la strategia di campionamento si è basata sulla selezione di 5 repliche di un'area elementare di campionamento di 3.5 x 1.5 m. Per ogni area elementare è stato steso, perpendicolarmente alle bine, un cordino contrassegnato da undici punti di misura spazati 35 cm. Sono quindi state misurate le componenti del bilancio, ovvero la radiazione incidente, trasmessa, riflessa dalla canopy e riflessa dal suolo. Queste misure hanno consentito quindi sia il calcolo della fAPAR, sia quello della fIPAR che differiscono sostanzialmente per la porzione riflessa dal suolo meno quella riflessa dalla canopy, contributo che diventa rilevante nel caso di una vegetazione sparsa o senescente mentre è poco influente per una copertura caratterizzata da elevati valori di indice di area fogliare

Le misure in campo sono state condotte nel periodo compreso tra Maggio e Ottobre 2004 con cadenza decadale. Le misure sono state raccolte in un intervallo di tempo che va dalle 11:30 alle 13:30 dell'ora solare e quindi sono da ritenersi istantanee e rappresentative del massimo carico solare.

### Misure satellitari MODIS

I dati MODIS utilizzati nello studio sono state le immagini relative al prodotto "MODIS Vegetation Indexes -16 Days - 250m" relative al periodo 2004. Le immagini forniscono una stima del valore dell'indice di vegetazione NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) normalizzato al NADIR e "depurato" dall'influenza delle nuvole, ad intervalli temporali di 16 giorni. L'algoritmo per la creazione delle immagini MODIS VI opera su ogni singolo pixel e si basa su osservazioni multiple relative a un periodo di 16 giorni per generare un valore di VI composito rappresentativo per il periodo di tempo considerato (Huete et al., 1999). Le immagini sono state ritagliate sull'area di interesse e riproiettate nel sistema di riferimento UTM-WGS84 e quindi organizzate in un unico file multitemporale. Nonostante l'algoritmo di produzione delle immagini preveda una fase di *screening* della qualità del dato finalizzata ad eliminare dalla procedura di *compositing* le osservazioni effettuate durante giornate nuvolose e a ridurre l'effetto della direzionalità della riflettanza sui valori dei VI calcolati, l'analisi delle immagini multitemporali ha evidenziato il permanere di notevoli errori nei valori degli indici calcolati. Per ovviare a questo problema è stato realizzato un codice di analisi in linguaggio IDL che permette di ricostruire l'andamento temporale corretto degli indici di vegetazione relativi a ciascun *pixel*. Questo procedimento ha consentito di ottenere profili temporali di alta qualità relativamente agli indici di vegetazione, a cui sono associate notevoli informazioni circa lo sviluppo fenologico della vegetazione.

A partire dalle osservazioni remote e dagli indici radiometrici si è quindi costruito il modello predittivo per la stima del radiazione fotosinteticamente attiva assorbita. Il modello per la stima della fAPAR è stato sviluppato tramite tecniche regressive ordinarie (OLS) e ortogonali (RMA). In quest'ultimo caso si assume che entrambe le variabili siano soggette a errore sperimentale.

## Risultati e conclusioni

Il primo risultato raggiunto è rappresentato dagli andamenti temporali della fAPAR e della fIPAR. Le due variabili sono risultate fortemente correlate ( $r^2 = 0,995$ ;  $RMSE = 0,020$ ), il che consentirà di misurare soltanto la frazione di radiazione intercettata durante le prossime campagne di misura previste. L'andamento temporale di queste variabili è assimilabile con una curva logistica con un flesso compreso fra il giorno dell'anno 200 e 220 e con un punto di massimo attorno alla misura del giorno giuliano 260 (16 settembre).

Sulla base delle misure dirette di biomassa e di APAR cumulata condotte è stato possibile calcolare il coefficiente di proporzionalità  $\varepsilon$  che indica l'efficienza di produzione di biomassa secca attraverso la fotosintesi, al netto della respirazione. Il calcolo di  $\varepsilon$  è stato realizzato per via grafica determinando il valore del coefficiente angolare della retta interpolatrice dei punti ottenuti plottando l'APAR cumulata nel tempo rispetto alla biomassa secca espressa in  $gC/m^2$ . Il valore di  $\varepsilon$  reale così stimato ha un valore di  $3,60 (gCm^{-2}MJ^{-1})$  ed è risultato pressoché costante nel periodo considerato, consentendo di ipotizzare che il sito non abbia subito alcuna forma di stress.

Successivamente, le immagini MODIS a 250 m sono state utilizzate per sviluppare un modello semi-empirico per la stima della fAPAR. La relazione semiempirica con modello RMA individuata tra l'indice NDVI e le misure a terra effettuate nelle diverse date è di tipo lineare (Fig. 2). La bontà della correlazione è stata valutata in base al coefficiente di correlazione lineare di Pearson ( $r$ ) ( $r = 0.68$ ) mentre la qualità del modello in termini di predizione è stata ottenuta impiegando la tecnica leave-one-out, esplicitando il coefficiente  $Q^2$  (percentuale di varianza spiegata dal modello in predizione,  $Q^2 = 0.56$ ) e l'errore in predizione in termini di errore quadratico medio ( $RMSE_{CV} = 0.15$ ).

Questi risultati dimostrano che le immagini MODIS a 250 metri di risoluzione al suolo possono essere efficacemente utilizzate per monitorare le dinamiche spatio-temporali della fAPAR delle coperture vegetali indagate, e quindi permettono di monitorare efficacemente il loro sviluppo fenologico.

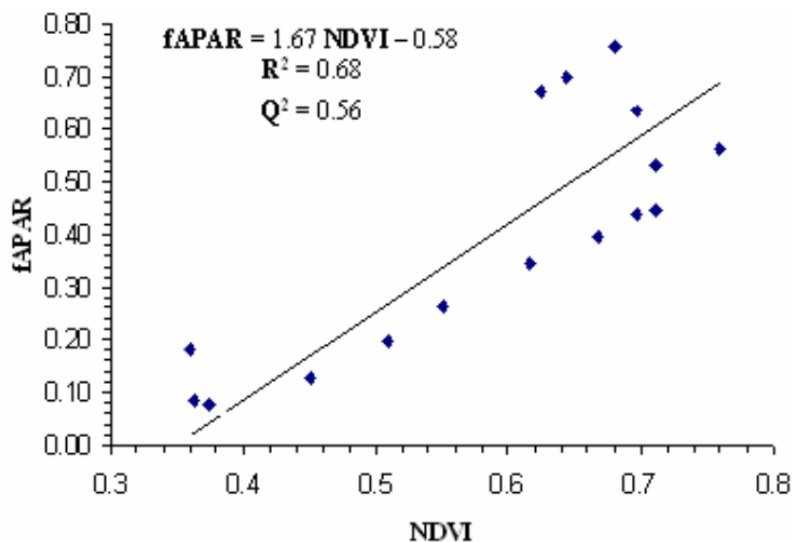


Figura 2. Regressione lineare RMA tra indice NDVI MODIS e fAPAR

Le relazioni così individuate sono state applicate alle immagini multitemporali MODIS, consentendo così di realizzare delle mappe che descrivono le variazioni spaziali e temporali del parametro per tutte le piantagioni presenti nell'area indagata. Le mappe di fAPAR così ricavate possono costituire importanti parametri di input per la parametrizzazione di modelli di stima della produzione primaria netta degli ecosistemi agro-forestali.

## Ringraziamenti

Questo studio è stato condotto nell'ambito del Progetto Kyoto: ricerca sui cambiamenti climatici e il controllo dei gas serra in Lombardia, promosso da Fondazione Lombardia per l'Ambiente. Gli autori desiderano ringraziare le Dott.sse I. Pagani e E. Matta (DISAT-UNIMIB) per il supporto alle campagne di misura.

## Bibliografia

- Chen J. M. (1996), "Canopy Architecture and Remote Sensing of the Fraction of Photosynthetically Active Radiation Absorbed by Boreal Conifer Forests", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34 (6): 1353-1368.
- Daughtry C. S. T., Gallo K., Goward S. N., Prince S. D. Kustas W. P. (1992), "Spectral Estimates of Absorbed Radiation and Phytomass Production in Corn and Soybean Canopies", *Remote Sensing of Environment*, 39: 141-152.
- Fensholt R., Sandholt I., Rasmussen M.S. (2004), "Evaluation of MODIS LAI, fAPAR and the relation between fAPAR and NDVI in a semi-arid environment using in situ measurements". *Remote Sensing of Environment* 91(3-4) s. 490-507.
- Gobron N., M. Meroni, J.-L. Widlowski R. Colombo, T. Lavergne, T. Zenone, O. Ausetat, L.A. Hunt, M. Verstraete and Seufert G. (2005), "Remote sensing FAPAR validation with in-situ measurements & 3D radiative transfer modeling: case study over Poplar sites (Ticino, Italy)". *Carboeurope-IP Integrated Project Meeting*, 10-13 January Dublin, Ireland.
- Hanan N. P., Prince S. D., Begue A. (1996), "Estimation of absorbed photosynthetically active radiation and net production efficiency using satellite data", *Agricultural and Forest Meteorology*, 76: 259-276.
- Huete, A. R, Justice, C. O., & Van Leeuwen, W. J. D. (1999), "MODIS Vegetation Index (MOD 13). Version 3. Algorithm Theoretical Basis Document" disponibile a <http://eospo.gsfc.nasa.gov/atbd/modistables.html>.
- Myneni, R. B., Nemani, R. R., and Running, S.W. (1997), "Estimation of global leaf area index and absorbed par using radiative transfer models". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 4:1380-1393.
- Nouvelloun Y., Begue A., Moran M. S., Lo Seen D., Rambal S., Luquet D., Chehnouni G., Inoue Y. (2000), "PAR extinction in shortgrass ecosystem: effects of clumping, sky conditions and soil albedo", *Agricultural and Forest Meteorology*, 105: 21-41.
- Ridao E., Conde J.R., Minguez M.I (1998), "Estimating fAPAR from nine vegetation indices for irrigated and non-irrigated faba bean and semileafless pea canopies". *Remote Sensing of Environment.*; 66:87-100.
- Running S.W., Baldocchi D.D., Turner D.P., Gower S.T., Bakwin P.S., Hibbard K.A. (1999), "A global terrestrial monitoring network integrating tower fluxes, flask sampling, ecosystem modeling and EOS satellite data", *Remote Sensing of Environment* 70: 108 – 127.
- Sellers, P.J. Mintz, Y. Sud, Y.C. and Dalcher, A. (1986), "A simple biosphere model (SiB) for use within general circulation models". *J. Atmos. Sci.* 43:505-531.