

STIMA DELL'INDICE DI AREA FOGLIARE (LAI) MEDIANTE IMMAGINI SATELLITARI MODIS E MISURE AL SUOLO NELLA VALLE DI GRESSONEY

Paolo ZAFFARONI (*), Daniela STROPPIANA (*), Mariano BRESCIANI (*), Mauro MUSANTI (*), Mirco BOSCHETTI (*), Antonio DI GUARDO (**), Pietro Alessandro BRIVIO (*)

(*) CNR – IREA, Istituto per il Rilevamento Elettromagnetico dell'Ambiente, Consiglio Nazionale delle Ricerche, via Bassini 15, 20133 Milano

(**) Dipartimento di Scienze Chimiche e Ambientali, Università dell'Insubria, via Valleggio 11, 22100 Como

Riassunto

Il LAI (*Leaf Area Index*) è una variabile fondamentale per descrivere la struttura della corona fogliare (*canopy*) e regola le interazioni fra la vegetazione e l'atmosfera. Il progetto ALPS05 ha avuto lo scopo di studiare l'effetto filtro' delle foreste alpine sugli inquinanti organici persistenti (*Persistent Organic Pollutants*, POPs). La campagna di misura al suolo con lo strumento LAI-2000 si è svolta nell'arco del 2005 in 14 siti rappresentativi della Valle di Gressoney, in Valle d'Aosta.. La raccolta dei dati ha compreso l'intero periodo vegetativo ed ha riguardato tre tipi di coperture: conifere, latifoglie e misto conifere-latifoglie. Per lo stesso periodo è stata acquisita una serie temporale di immagini MODIS (*composite* di 8 e 16 giorni) al fine di derivare un profilo degli indici di vegetazione NDVI, EVI (*Enhanced Vegetation Index*) e WDRVI (*Wide Dynamic Range Vegetation Index*). Per ognuna delle tre classi si sono quindi analizzate le correlazioni tra i dati raccolti a terra e i dati da satellite, andando a calibrare un modello semi-empirico che stima il LAI in funzione dell'indice di vegetazione. La relazione ottenuta è stata applicata all'area di studio con l'obiettivo di creare una mappa tematica di LAI, poiché la distribuzione spazio-temporale di questo indice è un parametro basilare per i modelli atmosferici che descrivono il destino ambientale dei POPs.

Abstract

LAI is a key variable for describing the structure and the architecture of forest canopy and therefore of major importance for modeling the interaction between vegetation and the atmosphere. The ALPS05 project aims to investigate the 'filter effect' of Alpine forests in the environmental fate of Persistent Organic Pollutants (POPs). In 2005 ground data have been collected using the LAI-2000 instrument in representative test sites in the Gressoney Valley, Northern Italy. Data collection covered the entire vegetative period as well as senescence for three types of land cover, namely: deciduous, conifers and mixed forests. A set of MODIS 8- and 16-day composite images have been acquired over the same period and processed in order to derive VIs' (Vegetation Indices) temporal profiles. The class-specific correlation between in situ LAI measurements and NDVI, EVI (Enhanced Vegetation Index) and the Wide Dynamic Range Vegetation Index (WDRVI) have been analysed in order to define a VI-LAI relationship based on the calibration of semi-empirical regression models. The so derived VI-LAI relationships have been applied to the study area with the objective of providing a thematic map of LAI. The spatially distributed LAI values are valuable data for characterising the vegetation compartment in multimedia models describing the environmental fate of organic contaminants.

Introduzione

Il monitoraggio ambientale a scala regionale e globale richiede dati spazializzati e registrati con un'elevata frequenza temporale. In questo contesto il Telerilevamento si è dimostrato essere l'unico strumento alternativo al campionamento manuale da terra. I modelli di chimica atmosferica necessitano di una descrizione analitica della vegetazione, poiché essa ha un ruolo rilevante negli scambi gassosi con l'atmosfera. Molte ricerche si sono recentemente concentrate sul monitoraggio degli inquinanti organici persistenti (*Persistent Organic Pollutants*, POPs) e in particolare sul ruolo che le foreste assumono nei meccanismi di trasporto e deposizione (Wegman et al., 2004). La biomassa fogliare, per il contenuto di grassi nella foglia, regola i processi di assorbimento e rappresenta un *input* necessario ai modelli che descrivono il destino dei POPs. Tuttavia l'affidabilità di questi modelli è limitata dalla disponibilità di dati che descrivano la distribuzione e la struttura delle differenti specie vegetali, in termini di variabilità spazio-temporale (Boschetti et al., 2006).

Il *Leaf Area Index* (LAI) descrive la struttura della corona fogliare e può essere misurato *in situ* con metodi diretti e indiretti. Ai fini del monitoraggio a lungo termine di una foresta, i metodi diretti sono difficilmente applicabili, poiché consistono nella raccolta delle foglie con campionamenti distruttivi e non distruttivi e nella misura dell'area fogliare (Gower et al., 1999). I metodi indiretti invece si basano sull'impiego di strumenti elettronici, come il LAI-2000 (*LICOR, Inc., Nebraska, USA*), e stimano il LAI in funzione della misura di trasmissività della luce attraverso la corona fogliare. Tuttavia, con l'esigenza di dati distribuiti a scala regionale, queste tecniche diventano troppo laboriose e costose. Il Telerilevamento offre l'opportunità di stimare il LAI a partire dalle misure spettrali da satellite, poiché sono molto correlate alla quantità di biomassa fogliare. Lo scopo di questo lavoro è stato quello di fornire stime di LAI spazialmente distribuite ai modelli atmosferici nel contesto del progetto ALPS05; mediante un approccio semi-empirico si è studiata la correlazione fra le misure di LAI *in situ* e gli indici spettrali di vegetazione (VI) derivati dalle immagini del sensore MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*).

L'indice NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) è stato impiegato perché è uno dei più utilizzati nella stima del LAI, anche se in foresta diventa poco sensibile alle variazioni dell'area fogliare per valori di LAI maggiori di 2-3 (Carlson, Ripley, 1997). Per ottimizzare la sensibilità alle grandi concentrazioni di biomassa, si sono valutati altri due indici: l'EVI (*Enhanced Vegetation Index*) (Liu, Huete, 1995) e il WDRVI (*Wide Dynamic Range Vegetation Index*) (Gitelson, 2004). L'EVI è stato sviluppato e calibrato specificatamente per il sensore MODIS; esso riduce l'influenza del segnale di *background* e gli effetti atmosferici. Il WDRVI invece è stato recentemente proposto per studi agronomici ed è una modifica dell'indice NDVI.

L'area di studio e i dati

La Valle di Gressoney

L'area di studio è la valle di Gressoney, in Valle d'Aosta. Essa ha uno sviluppo longitudinale per circa 40 Km, con quote comprese fra gli 800 e i 4600 m del Monte Rosa. Per la raccolta dei dati a terra sono stati selezionati 14 siti, collocati in tre diverse fasce altitudinali tra 1000 e 1800 m e comprendenti tre diverse classi di vegetazione (in base alla *Corine Land Cover*): conifere, latifoglie e misto.

I dati a terra

Le misure a terra di LAI sono state effettuate durante il 2005 con lo strumento LAI-2000, con una frequenza variabile fra i 15 giorni, ad inizio e fine della stagione vegetativa, e il mese durante la parte centrale. In ogni sito le misure sono state acquisite lungo un transetto (di circa 100 m), per un totale di 200 misure. Dopo una prima depurazione del *dataset*, alcune misure sono state scartate per l'inconsistenza con il *trend* stagionale atteso. La presenza di questi *outliers* potrebbe essere dovuta alle condizioni di illuminazione non ideale durante l'acquisizione. Le misure con il LAI-2000 sono

state riprocesate per correggere l'effetto di diffusione interfoliare (*multiple scattering*) e di *clumping*, ma solo per le conifere (Chen, Cihlar, 1996).

I dati da satellite

I dati da satellite consistono in indici di vegetazione calcolati a partire dalle misure spettrali del sensore Terra MODIS. Per l'intero anno 2005 sono stati acquisiti i prodotti standard MOD13Q1 e MOD09Q1 dal sito web *EOS Data Gateway Service* (<http://edcimswww.cr.usgs.gov/pub/imswelcom>). Il prodotto MOD13Q1 è costituito da sintesi temporali di 16 giorni degli indici di vegetazione NDVI ed EVI, ad una risoluzione spaziale di 250 m, oltre che dalle bande del rosso e dell'infrarosso vicino, utilizzate per calcolare il WDRVI (assumendo il parametro α pari a 0.05). Il prodotto MOD09Q1 invece contiene le bande del rosso e dell'infrarosso vicino con sintesi temporale di 8 giorni e risoluzione di 500 m, che sono state utilizzate per calcolare il NDVI e il WDRVI. L'EVI non è stato calcolato perché la banda del blu non è compresa in questo *dataset*.

Per tutti gli indici, le sintesi temporali sono state interpolate per ottenere una serie giornaliera applicando una procedura basata sul filtro di *Savitzky-Golay* e codificata in linguaggio IDL (*IDL Version 6.0.1, Research System, Inc., Boulder, CO, USA*).

Metodo

Per ogni classe di vegetazione, i valori medi degli indici, calcolati per una finestra di 2x2 pixel, sono stati combinati con le misure di LAI per calibrare un modello regressivo semi-empirico. Poiché nell'ambiente alpino la vegetazione è caratterizzata da un'elevata variabilità spaziale, si è reso necessario verificare le condizioni di omogeneità degli indici per ogni finestra, andando a calcolare il coefficiente di variazione (C_{VAR}).

Per ogni classe di vegetazione, le relazioni di regressione sono state stimate usando due terzi del *dataset* (fase di calibrazione). In questa fase si sono considerate sia una correlazione di tipo lineare che logaritmica, scegliendo quella migliore in base al coefficiente di determinazione (R^2). Nella fase di validazione una serie di parametri statistici indicativi dell'efficienza del modello (valor medio assoluto, MAE; errore quadratico medio relativo, RRMSE; efficienza del modello, EF) sono stati calcolati con il *dataset* non utilizzato in fase di calibrazione.

Nel caso delle foreste di latifoglie, il *dataset* è stato ulteriormente diviso nella fase di crescita e senescenza con l'obiettivo di osservare se la relazione LAI-VI varia in funzione dello stadio fenologico. Questo tipo di analisi è stata effettuata solo sulle latifoglie perché sono caratterizzate da una differenza molto marcata fra le due fasi; inoltre solo per questa classe la numerosità dei dati a terra era sufficiente per un'analisi di questo tipo.

Risultati

L'analisi del coefficiente di variazione ha mostrato che $C_{VAR} < 0.5$ per tutte le finestre di campionamento, confermando che la finestra di 2x2 pixel contiene valori omogenei. In tutti i casi analizzati, la regressione logaritmica ha fornito, come ci si attendeva, risultati migliori in confronto alla regressione lineare. Pertanto i seguenti paragrafi riportano i risultati relativi alla sola regressione logaritmica.

Relazione LAI – VI

Il modello regressivo migliore per tutte le 3 classi di vegetazione è stato ricavato dalla serie temporale NDVI a 16 giorni. Tutti gli indici di accuratezza calcolati nella fase di validazione indicano che l'indice NDVI è il migliore per la stima del LAI ($R^2 \geq 0.69$ e $RRMSE \leq 28.8$) sebbene i risultati più accurati si siano ottenuti per la classe di foresta di latifoglie. La figura 1 mostra, come esempio, lo scatterogramma dei valori di LAI e di NDVI a 16 giorni per le latifoglie. Le equazioni da 1 a 3 mostrano la relazione ricavata per ogni classe di vegetazione.

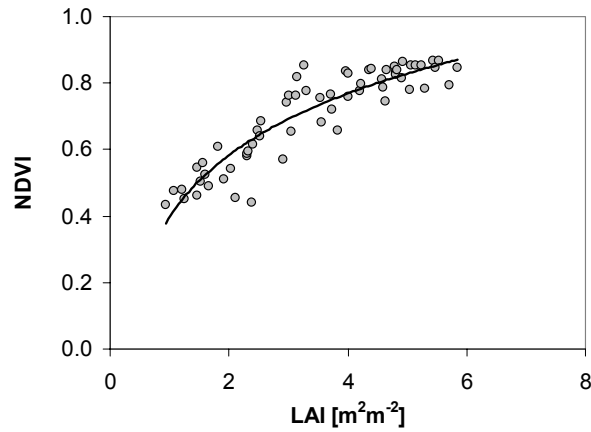


Figura 1 – Scatterogramma dei valori LAI-NDVI (16 giorni) per la classe latifoglie.

$$LAI_{LAT} = \exp\left(\frac{NDVI_{16} - 0.3981}{0.2674}\right) \quad n=62 \quad (\text{Eq. 1})$$

$$LAI_{MIS} = \exp\left(\frac{NDVI_{16} - 0.4038}{0.2508}\right) \quad n=24 \quad (\text{Eq. 2})$$

$$LAI_{CON} = \exp\left(\frac{NDVI_{16} - 0.2725}{0.329}\right) \quad n=15 \quad (\text{Eq. 3})$$

L'analisi di regressione in funzione dello stadio fenologico per le latifoglie ha fornito i risultati rappresentati in figura 2. L'indice migliore è risultato ancora il NDVI a 16 giorni e l'esigua differenza fra i parametri delle due curve di regressione suggerisce che i due modelli, derivati in modo specifico per le due fasi vegetative, non sono significativamente diversi. Questi risultati dimostrano che la calibrazione di due diversi modelli potrebbe non essere necessaria.

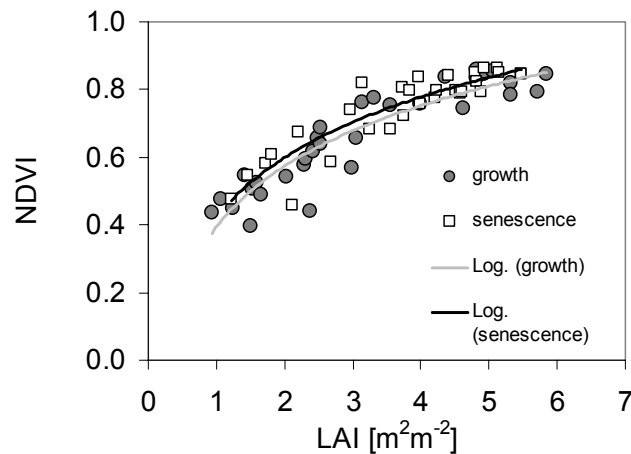


Figura 2 – Curve di regressione ottenute per la classe latifoglie in funzione dello stadio fenologico.

Mappa di LAI

Le relazioni mostrate nelle equazioni da 1 a 3 sono state applicate pixel per pixel alle immagini degli indici di vegetazione MODIS con lo scopo di stimare il LAI secondo la distribuzione spaziale delle classi di copertura vegetale derivata dalla *Corine Land Cover (CLC00)*. La serie temporale dei dati MODIS, interpolata con frequenza giornaliera, ha consentito la produzione di una mappa giornaliera di LAI con risoluzione spaziale di 250 metri.

L'accuratezza nella stima del LAI è stata valutata con il *dataset* di validazione; i risultati sono riportati in tabella 1.

Tabella 1 – Risultati della validazione dei modelli regressivi per le tre classi di copertura.

Class	n	R ²	MAE	RRMSE[%]	EF
Latifoglie	30	0.80	0.50	18.30	0.78
Misto	11	0.82	0.63	23.58	0.58
Conifere	6	0.55	0.84	28.78	-0.41

Analisi dei risultati

In questo lavoro si è studiata la correlazione fra gli indici di vegetazione MODIS e le misure di LAI al suolo per derivare un modello regressivo semi-empirico per tre classi di vegetazione. L'analisi del coefficiente di variazione ($C_{VAR} < 0.5$) ha mostrato che la media dei pixel compresi in una finestra 2x2 è una buona approssimazione del valore puntuale dell'indice di vegetazione.

L'analisi di regressione ha mostrato che il modello migliore è la funzione logaritmica fornita dall'indice NDVI a 16 giorni. Il *trend* logaritmico, osservato anche per gli indici EVI e WDRVI, conferma l'effetto di saturazione per alti valori di LAI già osservato in studi precedenti (Prince, 1991). Gli indici introdotti per ovviare a questo effetto, tipico dell'indice NDVI, non hanno fornito alcun miglioramento, soprattutto per l'EVI. Le correlazioni più alte si sono ottenute per le classi di foresta di latifoglie e di misto ($R^2 \geq 0.8$, $EF \geq 0.58$), probabilmente a causa della maggiore stagionalità del manto fogliare e quindi del segnale rilevato da satellite.

Il modello derivato per le conifere è il meno accurato con $R^2 = 0.55$ e RRMSE di poco inferiore al 30%; in questo caso la minore stagionalità e il periodo vegetativo più breve potrebbero aver influenzato il risultato. Inoltre, a causa della presenza di neve in alcune date alle quote più elevate, dove si trovano le conifere, e della indisponibilità di siti di misura adeguati (ossia con una vegetazione omogenea su un'area compatibile con la risoluzione spaziale MODIS), il numero di misure al suolo per questa classe ($n=21$) è molto inferiore rispetto alle altre due classi. Poiché il numero di dati di validazione (in questo caso solo 6) influisce sulla stima dell'accuratezza, sarebbe opportuno disporre di un maggior numero di dati di campo.

L'analisi svolta per le latifoglie considerando separatamente i due stadi fenologici di crescita e senescenza non ha evidenziato la necessità di derivare due modelli distinti. Questa conclusione è in disaccordo con i risultati ottenuti da Wang et al. (2005), che suggeriscono una dipendenza della relazione LAI-VI dallo stadio fenologico.

L'utilizzo dei modelli regressivi prodotti in questo lavoro ha fornito delle mappe giornaliere di LAI della valle di Gressoney per le classi di foresta di latifoglie, conifere e misto. Queste mappe costituiscono un dato di *input* fondamentale per i modelli che descrivono il destino ambientale dei POPs nel contesto del progetto ALPS05, all'interno del quale si è svolta questa ricerca. In generale, quindi, le mappe di LAI forniscono la caratterizzazione spazio-temporale dell'indice di area fogliare.

Conclusioni e prospettive future

Questo lavoro propone un modello per la stima del LAI a partire dagli indici spettrali di vegetazione per uno studio a scala regionale. Le misure a terra acquisite durante il 2005 sono state correlate ai valori di tre indici di vegetazione (NDVI, EVI e WDRVI) derivati dalle immagini MODIS in sintesi temporali di 8 e 16 giorni per tre classi di vegetazione: latifoglie, conifere e misto. Sia la fase di calibrazione che quella di validazione dell'analisi di regressione hanno mostrato che, per i tre tipi di foresta considerati, l'indice NDVI a 16 giorni fornisce il modello predittivo più accurato. In particolare, il modello ha un comportamento migliore per le classi latifoglie e misto. Per quanto riguarda le conifere, la scarsità di dati per la calibrazione e la validazione potrebbe aver influito negativamente sulla significatività degli indici di *fitting*/accuratezza; si renderebbe quindi necessaria una nuova campagna di misura focalizzata sullo sviluppo di un modello per la classe delle conifere. La distinzione fra crescita e senescenza nella classe di latifoglie ha evidenziato che non è necessario calibrare due modelli distinti per le due fasi; la scelta di un modello unico per tutta la durata della stagione permette anche di ovviare al problema del metodo di identificazione del momento di passaggio tra le due fasi.

Le mappe di LAI ottenute applicando le equazioni di regressione forniscono un valore giornaliero della variabile per ogni pixel dell'immagine MODIS appartenente alle classi latifoglie, misto e conifere identificate dalla *Corine Land Cover*. Pertanto esse forniscono una descrizione spaziotemporale della distribuzione del LAI per l'intera valle. Le mappe giornaliere di LAI a questa risoluzione costituiscono un'informazione importante per la stima della biomassa vegetale, sebbene essa richieda una descrizione della *Specific Leaf Area* (SLA) con una risoluzione affine.

Riferimenti bibliografici

- Boschetti M., Brivio P.A., Carnevale D., Di Guardo, A. (2004), "The contribution of hyperspectral remote sensing to identify vegetation characteristics to assess the fate of persistent organic pollutants (POPs) in the environment", *Annual of Geophysics*, 49: 177-186.
- Carlson T.N., Ripley D.A. (1997), "On the relation between NDVI, fractional vegetation cover and leaf area index", *Remote Sensing of Environment*, 62: 241-252.
- Chen J.M., Cihlar J. (1996), "Retrieving leaf area index of boreal conifer forests using Landsat TM images", *Remote Sensing of Environment*, 55: 153-162.
- Gitelson, A.A. (2004), "Wide dynamic range vegetation index for remote quantification of biophysical characteristics of vegetation", *Journal of Plant Physiology*, 161: 165-173.
- Gower S.T., Kucharik C.J., Norman J.M. (1999), "Direct and indirect estimation of leaf area index, f_{apar} , and net primary production of terrestrial ecosystems", *Remote Sensing of Environment*, 70: 29-51.
- Liu H.Q., Huete A.R. (1995), "A feedback modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33: 457-465.
- Prince S.D. (1991), "A model of regional primary production for use with coarse resolution satellite data", *International Journal of Remote Sensing*, 12: 1313-1330.
- Wang Q., Adiku S., Tenhunen J., Granier A. (2005), "On the relationship of NDVI with leaf area index in a deciduous forest site", *Remote Sensing of Environment*, 94: 244-255.
- Wegmann F., Scheringer M., Möller M., Hungerbühler K. (2004), "Influence of the vegetation on environmental partitioning of DDT in two global multimedia models", *Environmental Science & Technology*, 38: 1505-1512.